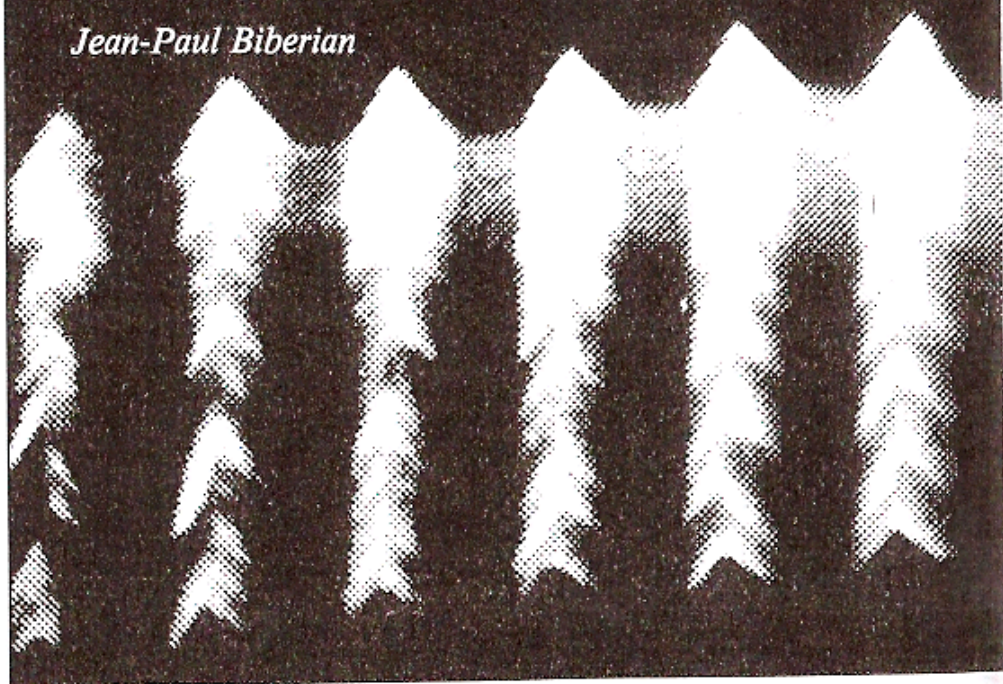
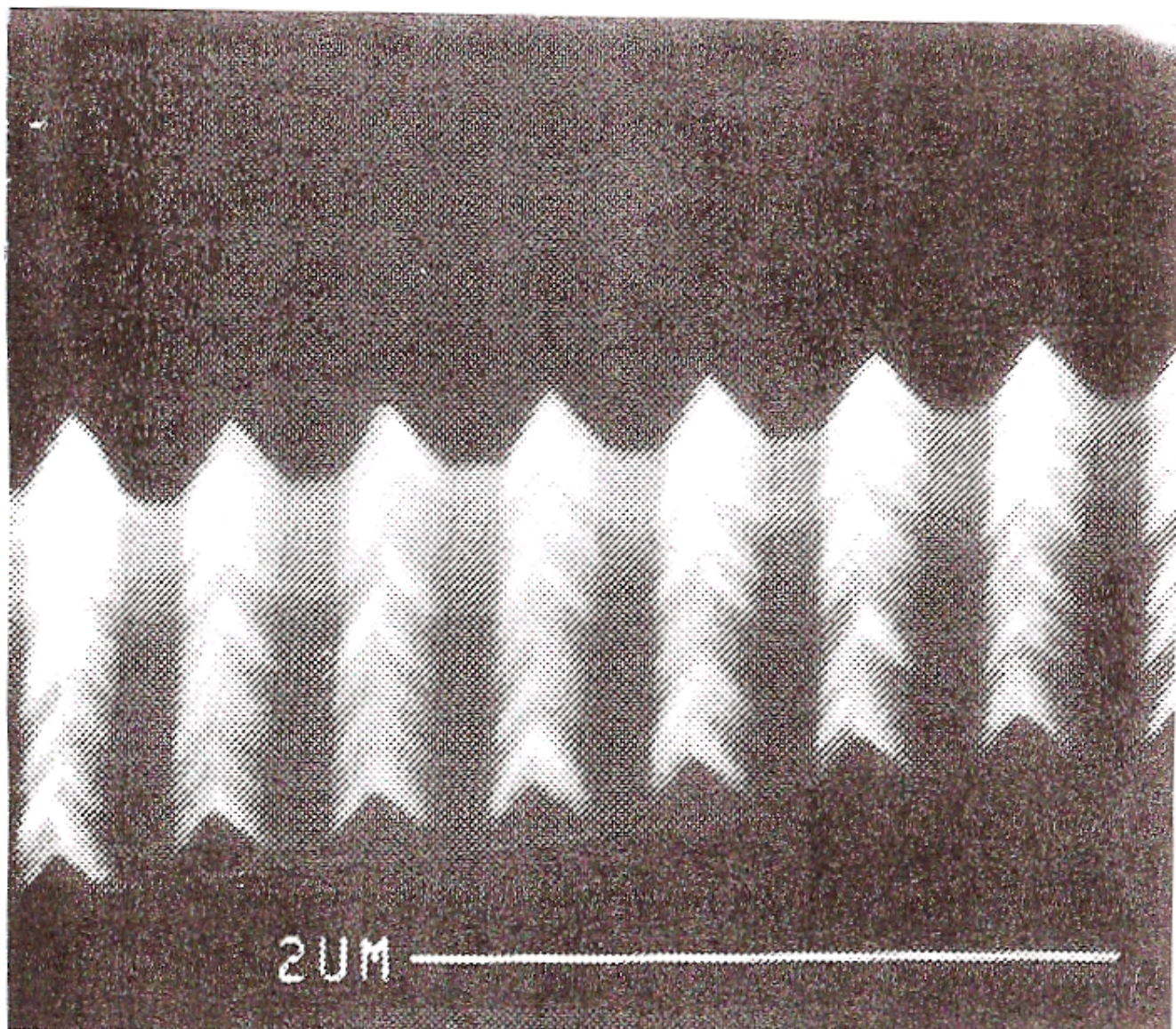


LES COMPOSANTS QUANTIQUES

Jean-Paul Biberian



Conséquence de l'incroyable réduction des dimensions des circuits intégrés, les lois physiques habituelles, qui s'appliquent à notre environnement quotidien et sont encore vraies pour les circuits intégrés actuels ne s'appliqueront bientôt plus. Avec la diminution de taille, de nouveaux phénomènes apparaissent. Ils s'expliquent par une théorie physique difficilement accessible à nos sens, la mécanique quantique, et dont Albert Einstein fut à l'origine. Nous allons voir dans cet article le pourquoi de cette évolution, et ce que l'on peut en attendre au niveau des nouveaux composants, ainsi que les applications existantes et à venir, en particulier en audio.



Vue en microscopie électronique à balayage d'une portion de ruban d'un laser DFB réalisé par épitaxie (doc. CNET Bagnex).

La mécanique quantique

A l'échelle macroscopique, nous décrivons la nature qui nous entoure à l'aide de nos sens, et de l'extension que sont nos instruments de mesure. Les phénomènes observés sont cohérents avec notre compréhension. Si l'on tire des balles de tennis un peu au hasard à travers un mur percé de deux trous, les balles vont passer évidemment par l'un ou l'autre trou. Si l'on bouche le

trou de gauche, toutes les balles passeront par le trou de droite. Si on fait l'inverse, le phénomène inverse se produira. Si on laisse les deux trous ouverts, ce que l'on observe est la somme des deux résultats précédents. La figure 1 donne une vue schématique de ce que l'on obtient. Les courbes tracées représentent le nombre de balles reçues en fonction de la distance dans le plan du mur de réception.

Si nous faisons une expérience similaire avec des ondes, par

exemple en prenant un système vibrant qui crée des ondes à la surface d'un bassin, et que de la même manière, nous mettions une paroi percée de deux trous, les ondes qui se propagent créent individuellement, lorsque l'on bouche l'un ou l'autre trou, une courbe d'intensité similaire à celle que l'on obtient avec les balles de tennis. Dans un cas ce sera par exemple le nombre de balles reçues en moyenne par décimètre, tandis que dans l'autre, il s'agira de la hauteur

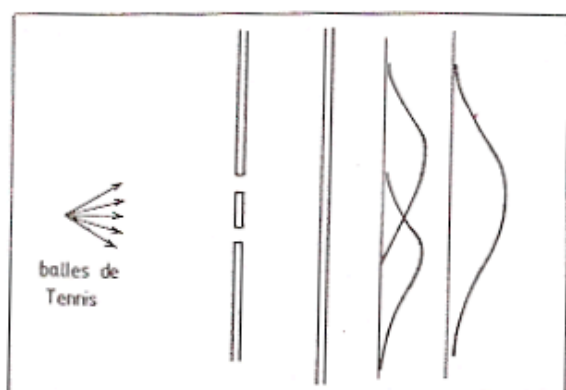


Fig. 1 : L'aspect particule, illustré ici par des balles de tennis lancées au travers de deux trous. La courbe résultante du nombre de balles reçues est la somme de celles ayant traversé chacun des trous.

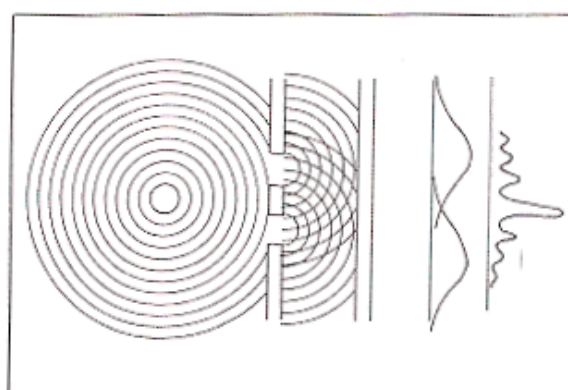


Fig. 2 : L'aspect onde, à l'inverse de la figure 1, la courbe résultante n'est plus en relation directe avec les courbes d'intensité de chacune des ouvertures. C'est une figure d'interférences.

moyenne de l'eau. Par contre dans le cas des ondes produites sur la surface de l'eau, si on ouvre les deux trous, on constate que le résultat obtenu est très différent, on observe ce que l'on appelle un phénomène d'interférence. La figure 2 décrit cette deuxième expérience.

A ce stade de l'analyse, nous voyons deux comportements différents ; d'une part, l'aspect particule, et d'autre part, l'aspect onde. Après que le génial Isaac Newton eut démontré que les lois d'attraction universelle permettaient de décrire aussi bien la chute des corps sur la Terre que le mouvement des planètes autour du Soleil, les savants de l'époque ont essayé de tout expliquer par la mécanique. La lumière elle-même étant constituée de grains de lumière. On s'est aperçu par la suite que celle-ci était en fait une onde puisque l'on pouvait faire des expériences de diffraction comme celle décrite dans la figure 2. Mais au début de ce siècle, Albert Einstein explique le phénomène de la photoémission, c'est-à-dire l'émission d'électrons après illumination, par l'existence de grains de lumière. La lumière a donc un aspect à la fois d'onde et de particule.

Si nous reprenons l'expérience des balles de tennis, et que petit à

petit nous diminuons la taille des balles, ainsi que la taille des trous, et toutes les autres distances, il apparaît que pour une taille petite, les résultats changent. Si par exemple on faisait la même expérience avec des électrons, au lieu d'obtenir les résultats de la figure 1, on obtiendrait ceux de la figure 2. L'électron est donc une onde. Pourtant une expérience plus fine montre que l'électron ne passe que par un seul trou, pas par les deux à la fois, on ne peut pas couper l'électron, et pourtant la diffraction a lieu ! L'électron a donc deux aspects : onde et particule. Evidemment nous avons du mal à imaginer cela, mais ne faisons pas de complexe, personne n'y arrive ! C'est un résultat d'expérience, et les faits sont là. Pour les objets de petite taille, les phénomènes sont mieux compris si on admet que les particules ont une onde associée. C'est la théorie de la mécanique quantique.

Pour que l'expérience de diffraction ait lieu, au moins d'une manière significative, il faut que la distance entre les trous soit comparable à la longueur d'onde associée à la particule. Pour la lumière visible, c'est de l'ordre du micron, c'est pourquoi, les films d'huile d'épaisseurs voisines du micron sur la surface de l'eau, donnent ces belles cou-

leurs par diffraction entre le dessus et le dessous de la couche d'huile. Pour les électrons c'est la même chose, par exemple des électrons possédant une énergie de 150 électrons-volts ont une longueur d'onde de 1 \AA , soit à peu près les dimensions des atomes. C'est d'ailleurs ainsi que Davisson et Germer ont en 1927 montré que les électrons étaient diffractés par un cristal de nickel. La figure 3 décrit simplement cette expérience.

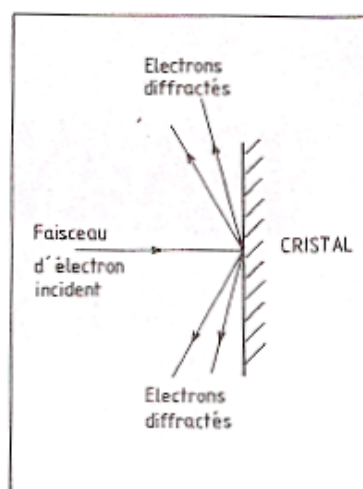


Fig. 3 : L'expérience de Davisson et Germer, les électrons sont diffractés par un cristal de nickel, révélant qu'une onde est associée à la particule, base de la mécanique quantique.

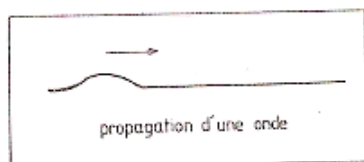


Fig. 4 : Propagation d'une onde le long d'une corde tendue.

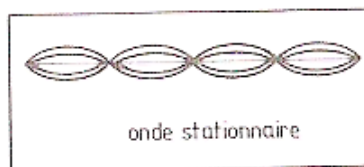


Fig. 5 : L'établissement d'une onde stationnaire le long d'une corde fixée à ses deux extrémités.

La propagation des ondes

Puisque dans certaines conditions les particules ont un aspect d'onde, nous allons essayer de comprendre, le comportement des ondes. Si nous prenons une corde tendue, infiniment longue, et que nous l'excitons par un choc à un endroit, cette excitation se propage le long de la corde, comme les vagues sur l'Océan. Par contre, si cette corde est limitée, comme pour une corde de guitare, on s'aperçoit qu'il y a formation d'une onde stationnaire, qui ne se pro-

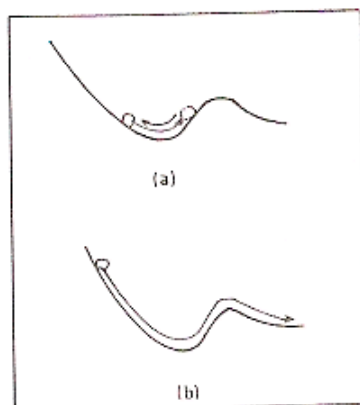


Fig. 6 : En physique classique, une particule ne peut franchir une barrière que si son énergie est suffisante, à l'image d'une bille devant franchir un obstacle.

page pas, avec des nœuds et des ventres, leur nombre dépend de la tension de la corde. Les figures 4 et 5 montrent ce phénomène d'ondes.

L'effet tunnel

En physique classique, une particule ne peut franchir un mur que si elle possède une énergie suffisante. La figure 6 illustre ce principe. On lâche une bille sur un plan incliné, si l'altitude du lâcher est inférieure à celle du col à franchir, la particule ne peut pas franchir la barrière et revient à sa position initiale, en fait se met à osciller indéfiniment dans ce puits (figure 6a), par contre si son altitude de départ est supérieure à celle du col, elle franchira la barrière et continuera sa course de l'autre côté. En physique classique, une particule passe ou ne passe pas suivant que son énergie est supérieure ou inférieure à celle de la barrière à franchir.

Toujours en physique classique, pour une onde les choses sont un peu différentes. On sait par exemple que la lumière qui est une onde électromagnétique est arrêtée par un métal. Ceci est vrai pour un métal épais, on ne peut pas faire de fenêtres métalliques transparentes. Par contre un film métallique très mince laisse passer la lumière avec une atténuation qui dépend de son épaisseur, c'est le principe des lunettes de soleil dont les verres sont recouverts d'un léger film d'or. On s'aperçoit donc que les

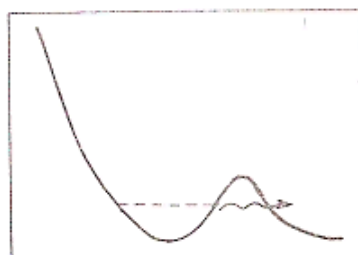


Fig. 7 : Illustration de l'effet tunnel en mécanique quantique.

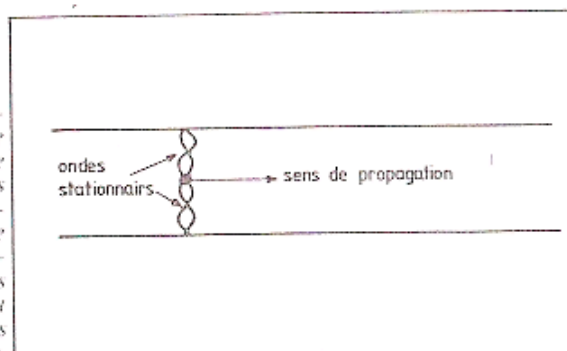
particules et les ondes ont des comportements différents vis-à-vis des barrières.

Si maintenant nous nous plaçons dans le cadre de la mécanique quantique, nous associons à une particule une onde qui va se comporter comme telle, c'est-à-dire laisser passer une partie et réfléchir le reste. Puisqu'une particule ne peut pas être coupée en deux, dans ce cas, nous avons une probabilité de passage de la particule à travers la barrière énergétique, c'est ce que l'on appelle l'effet tunnel ; la figure 7 illustre ce point.

Les électrons

La longueur d'onde des électrons varie comme l'inverse de la racine carrée de leur énergie, à faible énergie, ils ont une grande longueur d'onde. Si on place des électrons dans des boîtes de dimensions comparables aux longueurs d'onde associées, dans une, deux ou trois directions, on obtient un comportement tout à fait singulier. La figure 8 décrit le comportement d'un électron

Fig. 8 : Un électron dans une boîte infiniment longue et petite dans ses deux autres dimensions, révèle le double aspect particule, dans le sens de la longueur et onde dans les autres directions.



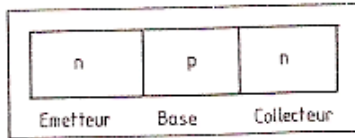


Fig. 9 : Les premiers transistors ont été à partir de mono cristaux dopé n pour l'émetteur et le collecteur et p pour la base (transistor npn).

dans un conducteur parallélépipédique infini dans une direction, mais petit dans les deux autres directions. Dans une direction, l'électron se comporte comme une particule, tandis que dans les deux autres, il se comporte comme une onde !

Les nouvelles techniques de fabrication

Les premiers transistors et diodes à semiconducteurs ont été élaborés à partir de mono cristaux de germanium, puis de silicium dopés différemment suivant les zones comme le montre la figure 9. Dans ce cas, il s'agit d'un transistor npn, où l'émetteur est dopé n, c'est-à-dire riche en électrons, la base est dopée p, c'est-à-dire riche en trous, et le collecteur est dopé n à nouveau.

Technologiquement, le dopage a été réalisé au début par diffusion d'impuretés sélectionnées pour leur caractère donneur ou accepteur d'électrons, puis parce que la jonction ne pouvait pas être suffisamment abrupte par implantation ionique. Les figures 10 et 11 montrent l'amélioration de la jonction entre ces deux techniques, puisque par diffusion (figure 10), on n'obtient qu'un profil de concentration continu, tandis que par implantation ionique, où des ions des atomes dopants sont bombardés sur le matériau, la pénétration est liée à l'énergie des ions qui est constante, par conséquent, la zone dopée (figure 9) sera beaucoup plus localisée.

Dans ces deux cas, cependant, les dimensions sont de l'ordre du micron, et les électrons dont la longueur d'onde associée est petite ne ressentent pas les effets quantiques. Pour ce faire, il faudrait réaliser des objets de dimensions plus petites.

Depuis maintenant une quinzaine d'années, une nouvelle technologie a vu le jour, l'Épitaxie par Jet Moléculaires (Molecular Beam Epitaxy en anglais), où des flux atomiques de divers éléments sont déposés sur un substrat monocristallin, couche atomique après couche atomique avec un excellent contrôle des quantités déposées, (voir l'Audiophile n° 9 sur les transistors en arsénium de gallium). On est ainsi capable de contrôler la fabrication des jonctions avec une précision de l'épaisseur d'une couche atomique.

Les matériaux construits de cette façon sont évidemment totalement nouveaux et inconnus dans la nature, ils ouvrent de nombreuses perspectives dans de nombreux domaines, et pas seulement en électronique, mais également en métallurgie pour fabriquer des alliages aux compositions et propriétés inhabituelles. De nombreux travaux sont en cours pour réaliser des nouveaux matériaux magnétiques, en plaçant des atomes de fer ou autres dans un environnement cristallin inhabituel. On essaie de trouver aussi de cette manière des supra conducteurs haute température avec des températures critiques de transition plus élevées que celles obtenues actuellement. Pour les rayons X, de nombreux travaux sont en cours pour la fabrication de miroirs à partir de centaines de multicouches de quelques atomes d'épaisseur.

Les nouveaux concepts possibles

Grâce à ces nouvelles techniques dont nous venons de parler,

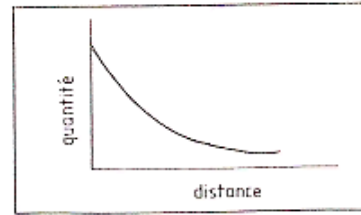


Fig. 10 : Le dopage par diffusion.

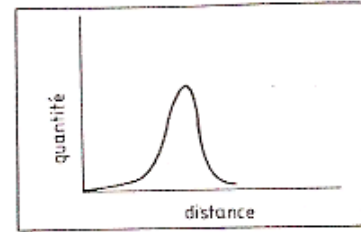


Fig. 11 : Le dopage par implantation ionique autorise une localisation beaucoup plus précise que la méthode par diffusion.

il est possible de réaliser des hétérojonctions, c'est-à-dire des jonctions entre deux matériaux différents, et non pas d'un même matériau, comme dans le cas traditionnel décrit dans la figure 9, que l'on appelle maintenant une homéojonction. La différence fondamentale entre ces deux approches est que dans le cas de l'homéojonction, les bandes de valence et de conduction du semiconducteur (qui correspondent respectivement aux électrons liés au réseau et aux électrons mobiles) ne changent pas. Ce qui varie en fonction du dopage, c'est le nombre d'électrons ou de trous disponibles pour réaliser la conduction. Par contre dans le cas de l'hétérojonction, les bandes de valence et de conduction des deux matériaux sont différentes, et toutes sortes de combinaisons sont possibles. La figure 12 décrit ce phénomène. Pour deux matériaux dopés n on remarque qu'en plus de la différence énergétique entre les deux matériaux, une courbure de ces niveaux apparaît à l'interface.

Les matériaux utilisés pour ce genre d'applications peuvent être divers. Historiquement, ce sont

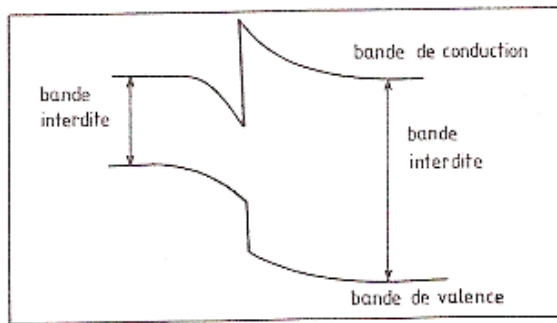


Fig. 12 : L'hétérojonction met en œuvre des matériaux différents et autorise toutes sortes de combinaisons.

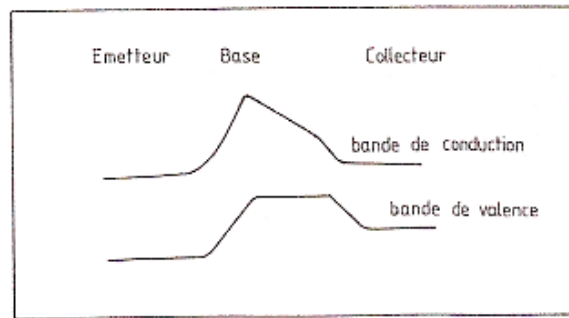


Fig. 13 : Transistor rapide à base graduelle.

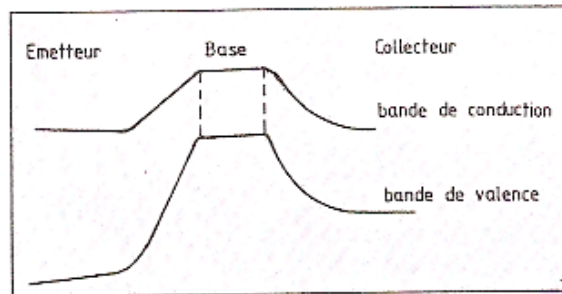


Fig. 14 : Transistor bipolaire à émetteur graduel.

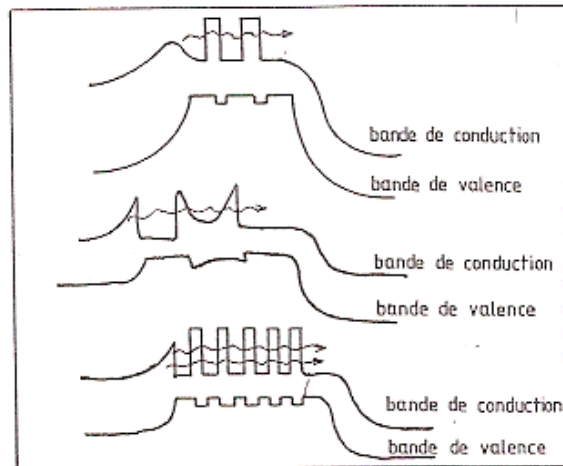


Fig. 15 : Transistor bipolaire à résonance tunnel.

les matériaux III-V qui ont été les premiers employés, à cause de leurs applications pour les circuits rapides, et l'opto-électronique (voir l'Audiophile n° 9). Cependant, les techniques développées ont été élargies à la majorité des éléments, et maintenant on est capable de faire de la croissance épitaxiale, c'est-à-dire avec continuité cristalline de très nombreux matériaux. On fait croître du germanium sur du silicium qui ont des paramètres cristallins différents, mais le cas le plus facile, est sans nul doute le GaAs/GaAlAs, où les paramètres cristallins sont quasiment indépendants de la quantité d'aluminium remplaçant le gallium. On peut donc faire des couches alternées d'épaisseurs variables.

Les nouveaux composants

En ce qui concerne les composants que l'on peut élaborer avec de tels procédés, les possibilités sont très variées, et de nombreu-

ses idées ont été avancées. Certaines ont été testées, mais de nombreuses autres attendent de l'être. Souvent on ne sait même pas quelles seront les applications possibles, s'il y en a ; mais les arrangements proposés permettent aussi de mieux comprendre les phénomènes physiques en jeu.

• Le transistor rapide à base graduelle

Le fait de fabriquer un transistor avec une base très fine permet d'obtenir des champs électriques très élevés. Dans le cas décrit en figure 13, le composant a été élaboré par Epitaxie par Jet Moléculaire. Un substrat de GaAs a été utilisé sur lequel une couche de GaAs tampon a été déposée, puis une couche dopée n de $1,5 \mu\text{m}$ est utilisée comme collecteur. La base de $0,45 \mu\text{m}$ d'épaisseur est déposée avec une

concentration variable entre GaAs pur, et GaAlAs, dopée p. Enfin le collecteur est une couche de GaAlAs de $1,5 \mu\text{m}$ dopée n.

Un tel circuit permet d'amplifier les impulsions d'un laser avec un temps de réponse de 20 pico secondes ($1\text{ps} = 10^{-12}\text{s}$)

• Les transistors bipolaires à émetteurs graduels

De la même manière, on peut réaliser des transistors dont l'émetteur a une concentration graduelle, et qui permettent d'obtenir de grands gains avec de forts courants. La figure 14 montre le schéma énergétique d'un tel composant, avec trois cas possibles : deux couches abruptes dans la base, une concentration parabolique, ou un ensemble de multi-couches.

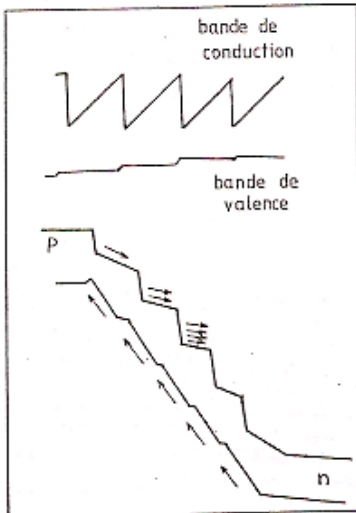


Fig. 16 : Photodiode à effet d'avalanche à structure à marche.

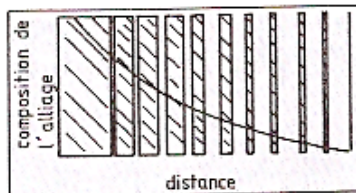


Fig. 17 : Super-réseau à bande interdite de largeur variable.

• Les transistors bipolaires à résonance tunnel

La figure 15 montre les emplacements nécessaires pour réaliser ce composant. Dans ce cas, les électrons passent à travers les multicouches de la base par effet tunnel, car celles-ci sont très fines.

De tels composants peuvent servir de photodétecteurs avec

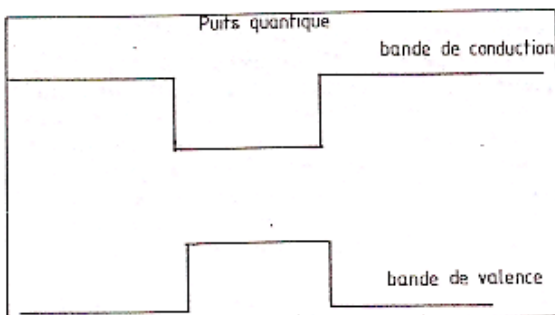


Fig. 18 : Schéma énergétique d'un laser à puits quantique.

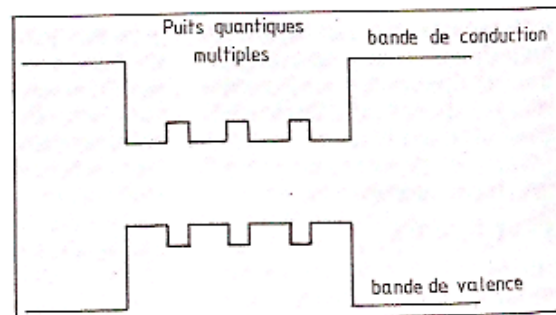


Fig. 19 : Laser quantique à puits multiples.

amplification des électrons au passage de chaque barrière.

• Les photodiodes à effet d'avalanche à structure à marche

La figure 16 montre le schéma d'une telle diode sans champ électrique, et avec champ électrique, la jonction entre les zones p et n ayant une forme de dents de scie.

• Les super-réseaux à bande interdite de largeur variable

La figure 17 représente une structure dont la composition des multi-couches varie d'une manière parabolique. Un tel système permet d'obtenir des transistors très rapides.

• Les lasers solides

Les lasers à double hétérostructure sont constitués d'une couche active de 0,1 à 0,3 μm d'épaisseur (récemment on a réalisé des couches de 100 Å , soit 40 couches atomiques seulement) prise en sandwich entre deux couches ayant une bande interdite plus grande, on se retrouve donc dans le cas décrit au début de cet article, où dans une des directions, les électrons ont un caractère quantique, car la longueur d'onde associée est comparable à l'épaisseur de la couche. On les appelle, pour cela lasers à puits quantique. En changeant la largeur du puits quantique, on peut facilement

faire varier la longueur d'onde de la lumière émise. La figure 18 montre le schéma énergétique de ce type de laser.

D'autres lasers ont été développés utilisant des puits quantiques multiples, qui permettent d'avoir une émission plus stable en fonction de la température (voir figure 19).

Conclusion

Nous avons vu dans cet article que les dimensions des circuits intégrés devenant de plus en plus faibles, de nouveaux phénomènes physiques apparaissent : les effets quantiques pour lesquels les électrons ne peuvent plus être considérés comme des particules, ils ont aussi un caractère ondulatoire. Ces nouveaux composants ont vu le jour grâce à une nouvelle technologie connue sous le nom d'Épitaxie par Jet Moléculaire qui permet de contrôler parfaitement la croissance d'un matériau sur un autre, en respectant la structure cristalline du substrat.

Ces nouveaux composants ont des applications possibles pour les transistors rapides, les photodétecteurs, les amplificateurs d'électrons, les lasers. En audio, les applications existent ou vont exister. Les lasers pour disques compacts, et les fibres optiques, mais aussi pourquoi pas, dans un avenir plus lointain, des amplificateurs à grand gain qui viendront peut-être enfin détrôner les amplificateurs à tubes.