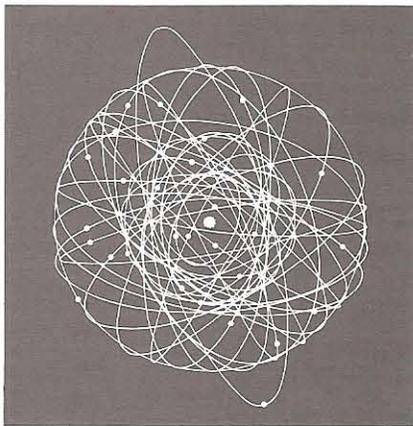
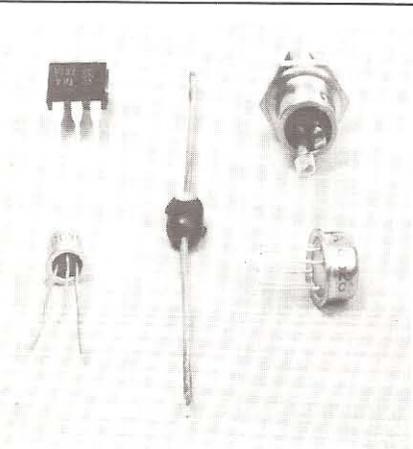


Qu'est-ce que l'électronique?



Modèle d'atome



Composants à semiconducteurs

L'accroissement rapide de la population du globe contraint l'humanité à repenser entièrement des concepts fondamentaux comme l'alimentation, le travail, l'environnement et les loisirs.

Les multiples tâches qui ont surgi ne peuvent plus aujourd'hui être maîtrisées qu'à l'aide d'un outil puissant: l'électronique. Production de masse, consommation de masse et information à l'échelle mondiale illustrent bien cette évolution gigantesque. L'électronique s'impose de plus en plus dans la technique et dans la vie quotidienne. Elle effectue les travaux routiniers avec une rapidité et une précision que la main de l'homme n'avait jamais pu atteindre. L'électronique libère le cerveau de l'homme et rend ainsi disponible un énorme potentiel de pensée et de travail.

Qu'est-ce que l'électronique? Un slogan publicitaire? Pas du tout! L'électronique est une réalité de notre temps. D'après son étymologie, elle est liée aux électrons, ces minuscules particules d'électricité. Découverte, autrefois, lors de l'étude des courants basse tension, elle est devenue, petit à petit, une branche indépendante de l'électrotechnique. Au cours de ce développement, les composants créés à partir des corps semiconducteurs jouent un rôle de premier plan.

L'électronique est devenue également un facteur économique important: en Allemagne Fédérale, trois millions de personnes environ lui consacrent leur travail, sans oublier les innombrables électroniciens amateurs qui réalisent aussi des choses étonnantes. Nombreux sont ceux qui s'intéressent à l'électronique en général, ou à des domaines bien particuliers. Le présent manuel s'adresse aussi à ces adeptes.

Principe de la conduction électrique

On a dit que le développement de l'électricité était comme un roman palpitant que ne prend jamais fin. Et en fait, dans ce vaste domaine, on voit constamment surgir de surprenantes nouveautés: pensons seulement au microscope électronique, à la transmission sans fil du son et des images, aux centrales électriques atomiques ou à l'électronique qui, sans le développement des composants à semiconducteurs, n'aurait jamais pu prendre un tel essor.

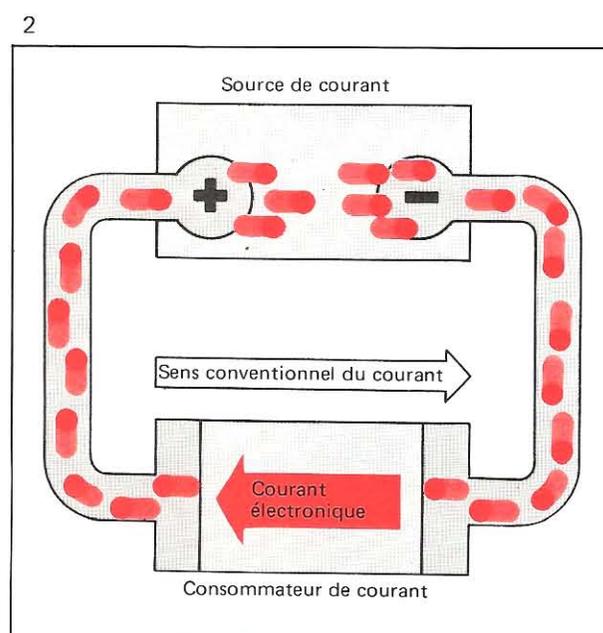
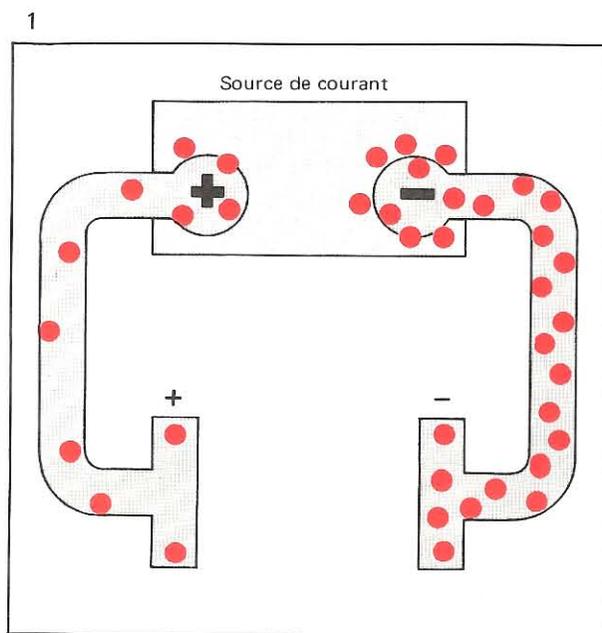
L'enseignement de l'électricité, à ses débuts, s'est contenté d'affirmer qu'il existait une électricité positive (+) et une électricité négative (-), c'est-à-dire des charges électriques, et que les charges de nom contraire s'attiraient alors que celles de même nom se repoussaient. A partir de ce phénomène, on a fixé arbitrairement les dénominations positif et négatif. Ce choix s'est révélé tout à fait malencontreux, car c'est seulement plus tard qu'on a établi que les charges électriques ont toutes le même signe et que les "porteurs" d'électricité sont exclusivement les *électrons*. Une charge électrique négative n'est donc qu'une accumulation d'électrons par rapport à son voisinage. De ce fait, le voisinage lui-même acquiert automatiquement une charge positive. Il est chargé positivement. Comme une accumulation d'électrons crée une charge négative, selon la dénomination conventionnelle arbitraire, l'électron individuel, en tant que porteur de cette charge, doit être lui-même *négatif*. Du fait que l'électron possède la plus petite charge électrique existant dans la nature, cette charge a été nommée "*charge élémentaire*". L'unité de charge électrique est le coulomb (C) ou encore l'ampère-heure (Ah).

Lorsqu'on ferme un circuit électrique, les électrons commencent à circuler, à l'extérieur de la source, du pôle négatif au pôle positif. A l'intérieur de la source, par exemple à l'intérieur d'une pile, les électrons doivent obligatoirement revenir au pôle négatif. C'est à cette

seule condition qu'un courant d'électrons est possible. Entre le pôle négatif et le pôle positif, il existe une tension électrique qui agit en tant que force déterminant le courant d'électrons. Au pôle négatif, contrairement au pôle positif, règne une surpression d'électrons qui, à travers le câble conducteur, pousse les électrons vers le pôle positif. Malgré ce fait irréfutable, on persévère à dire que le courant électrique circule en sens inverse, c'est-à-dire du pôle positif au pôle négatif; on appelle ce sens, le *sens conventionnel du courant*.

Le sens conventionnel du courant a été déterminé à une époque où l'on ne savait encore rien des électrons. Il est en relation directe avec le choix du signe de la charge électrique. En conséquence, il faut concevoir le courant électrique comme un transport de charges positives. Il existe des cas particuliers où le courant résulte non seulement des électrons, mais aussi — le plus souvent partiellement — du déplacement de charges positives. C'est pourquoi, principalement en électronique, il est avantageux de connaître les deux versions du sens du courant électrique. Dans les schémas, vous reconnaîtrez le sens conventionnel du courant au sens de la flèche du symbole graphique des diodes, transistors ou autres composants à semiconducteurs. Occasionnellement vous trouverez dans certains schémas, établis pour la description du fonctionnement, des flèches supplémentaires. La pointe des flèches indique toujours le sens du courant à partir du pôle positif.

- La charge élémentaire est la plus petite charge électrique qui existe dans la nature.
- L'électron est porteur d'une seule charge élémentaire. Cette charge est négative.
- Le sens conventionnel du courant est opposé au sens du déplacement des électrons.
- Le sens conventionnel du courant est indiqué par des flèches dans les schémas. La pointe de la flèche indique toujours le sens du courant à partir du pôle positif.

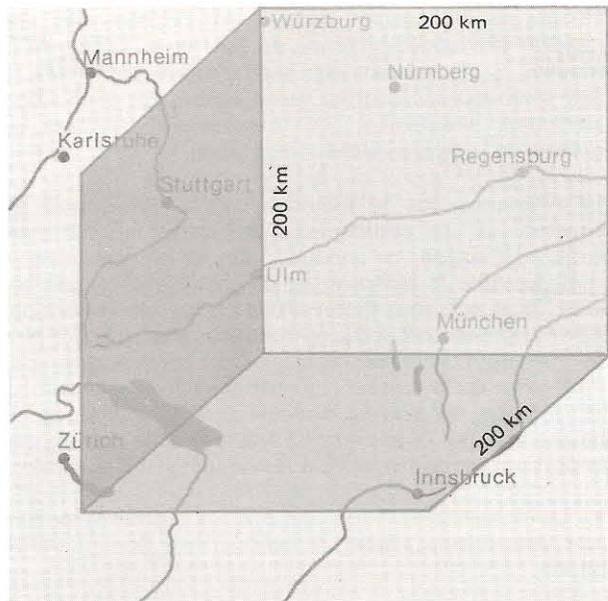


Conduction électrique dans les métaux

Les métaux sont de très bons conducteurs du courant électrique; les meilleurs sont l'argent, le cuivre, l'or et l'aluminium. La haute conductivité des métaux est due à la présence d'un très grand nombre d'électrons pouvant se déplacer quasi librement entre les atomes du métal (électrons de conduction). Par atome, on compte en moyenne un électron de conduction. Un fil de cuivre de 1 mètre de long et de 1 mm² de section renferme approximativement 85 000 trillions ($85 \cdot 10^{21}$) atomes de cuivre, et en conséquence autant d'électrons conducteurs.

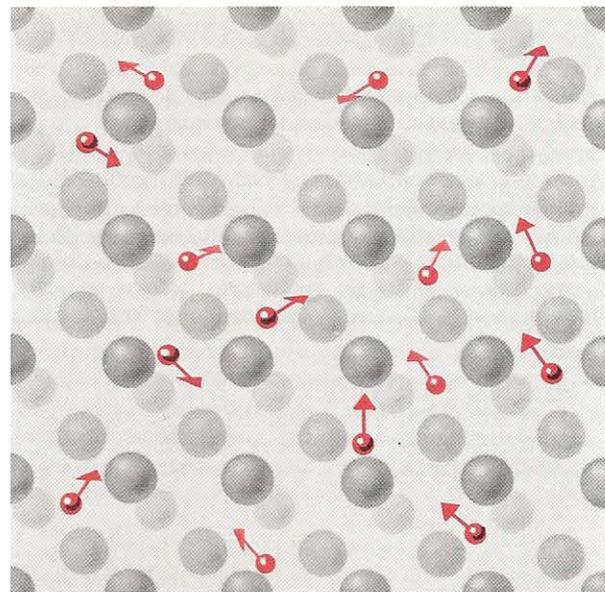
Aussi longtemps qu'aucun courant ne circule dans le fil, c'est-à-dire qu'aucune tension ne règne à ses extrémités, les électrons de conduction circulent dans le plus grand désordre. Les atomes du métal qui s'agitent en tous sens des milliards de fois par seconde, les projettent dans toutes les directions; aucun sens de déplacement n'est privilégié. Il en résulte qu'aucun transport de charge n'est effectué et nous pouvons dire que le fil est "sans courant". Cependant, si nous établissons une tension aux extrémités du fil, les électrons se déplacent vers le pôle positif, non pas en ligne droite mais en zigzag car, comme auparavant, ils sont toujours soumis à des chocs en tous sens de la part des atomes, à l'image de ballons de football sous les coups de pied des joueurs. Inversement, les électrons accélérés par la tension heurtent les atomes du métal dont les oscillations s'amplifient, ce qui se traduit extérieurement par l'effet Joule. Si l'on élève l'intensité du courant, le fil devient de plus en plus chaud jusqu'à ce que, finalement, il rougisse et fonde.

Contrairement à une opinion très répandue, les électrons sous l'influence de la tension ne se déplacent qu'à une vitesse très réduite dans les métaux solides: dans un fil de cuivre de 1 mm² de section parcouru par un courant continu d'un ampère, un électron de conduction ne parcourt que 5 millimètres environ à la minute. Si l'on élève par exemple l'intensité à 10 ampères, les électrons circulent 10 fois plus vite. Toutefois, lorsqu'on ferme le circuit, la première impulsion de déclenchement de la



3

4



5

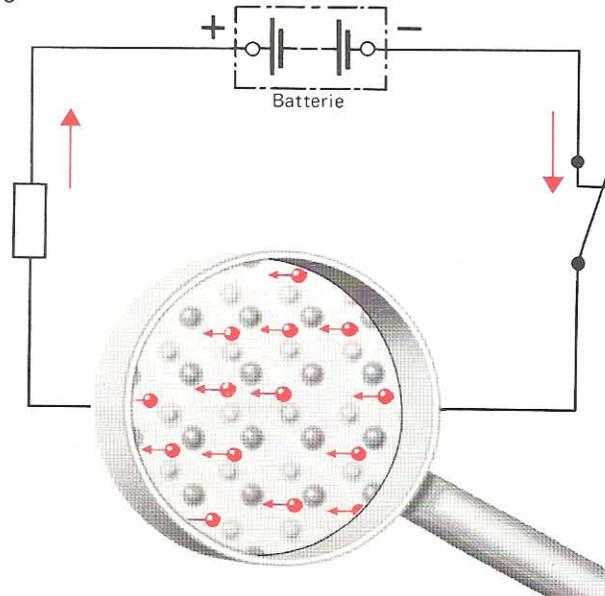


Fig. 1 Dans un circuit interrompu, un défaut d'électrons existe côté positif et un excès d'électrons côté négatif. La coupure du courant empêche l'égalisation des charges.

Fig. 2 Lorsqu'on ferme le circuit sur un appareil consommateur de courant (radiateur, moteur, etc.), les électrons s'écoulent à l'extérieur de la source de courant, du pôle négatif au pôle positif, c'est-à-dire en sens opposé au sens conventionnel du courant.

Fig. 3 Par cette figure, nous voudrions vous rendre tangible le gigantesque nombre de 85 000 trillions. Tandis que 85 000 trillions d'atomes de cuivre ne constituent qu'un cube de cuivre de 1 cm d'arête, il faudrait un réservoir cubique de 200 km d'arête pour contenir 85 000 trillions de gouttes d'eau, ce qui correspond à 7 fois le contenu de la mer Méditerranée ou 170 000 fois celui du Lac de Constance!

Fig. 4 En l'absence de tension, les électrons de conduction se déplacent en désordre entre les atomes de métal.

Fig. 5 Sous l'influence de la tension, les électrons de conduction se déplacent vers le pôle positif.

circulation du courant dans le fil s'établit avec une rapidité prodigieuse, voisine en fait de la vitesse de la lumière. Si un courant alternatif s'écoule dans le fil au lieu d'un courant continu, les électrons de conduction exécutent simplement un mouvement oscillant au rythme de la tension alternative établie.

La résistance que le matériau conducteur oppose au courant est une conséquence des chocs innombrables entre les électrons de conduction et les atomes en vibration. Lorsque la température du métal s'élève, soit par effet Joule soit sous l'effet d'une chaleur extérieure, les vibrations des atomes s'accroissent; les électrons ont plus de difficulté à se déplacer vers le pôle positif sous l'influence de la tension. La résistance devient plus forte et l'intensité du courant diminue aussi longtemps qu'on ne modifie pas la tension. La figure 6 nous montre une importante notion relative à la conductivité des métaux.

- La résistance électrique des métaux augmente lorsque leur température s'élève; la conductivité devient moins bonne.

C'est là une propriété très caractéristique des métaux. Par contre, les métalloïdes — pour anticiper — ont en général un comportement opposé, indépendamment du fait qu'ils sont eux-mêmes moins bons conducteurs que les métaux.

Si l'on refroidit un métal, les électrons de conduction se déplacent toujours de plus en plus facilement entre les atomes, car les vibrations de ces derniers s'atténuent les chocs sont moins nombreux et moins forts. Cela signifie que les métaux conduisent d'autant mieux le courant que leur température est plus basse. Au voisinage du zéro absolu ($0^\circ \text{Kelvin} = -273,16^\circ \text{C}$), la résistance de nombreux métaux disparaît totalement; leur conductivité devient infinie. C'est ce qu'on appelle la "supraconductivité".

Contrairement aux métaux, les isolants sont de très mauvais conducteurs de l'électricité, c'est pourquoi on dit qu'ils sont "non conducteurs", bien qu'on sache pertinemment qu'il n'existe pas d'isolant idéal. Même pour

une forte tension, le courant est si faible dans les isolants qu'on ne peut en déceler la présence qu'à l'aide d'appareils de mesure très sensibles. L'ambre, le verre, la porcelaine, le mica et l'ébonite étaient autrefois les principaux isolants électriques connus. Aujourd'hui, la gamme des isolants s'est largement étendue avec les matières plastiques spéciales telles que les polyéthylènes, polyesters, Téflon, polycarbonate, etc.

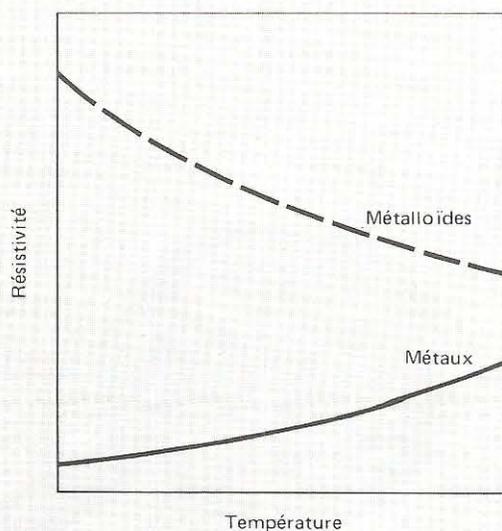
Conduction électrique dans les semiconducteurs

Les matériaux utilisés en électrotechnique ont des aptitudes très différentes à conduire le courant électrique, depuis les métaux bons conducteurs jusqu'aux isolants. Entre les conducteurs métalliques et les isolants se situent les semiconducteurs aux propriétés techniques d'une très grande importance, ainsi nommés parce qu'ils conduisent le courant électrique moins bien que les métaux mais mieux, en règle générale, que les isolants. On distingue les semiconducteurs ioniques et les semiconducteurs électroniques.

Dans les semiconducteurs ioniques, comme leur nom l'indique, les porteurs de charge sont des ions. Parmi les semiconducteurs ioniques on peut citer le sel gemme. Les ions positifs se déplacent en direction du pôle négatif et les ions négatifs en direction du pôle positif. Il se produit dans ce cas un transport de matière qui modifie la matière même du semiconducteur ionique. Le phénomène est comparable à l'électrolyse d'une solution de sel ou d'acide. Les propriétés spéciales des semiconducteurs ioniques font que ceux-ci ne sont guère indiqués comme matériau pouvant servir à la fabrication de composants électroniques.

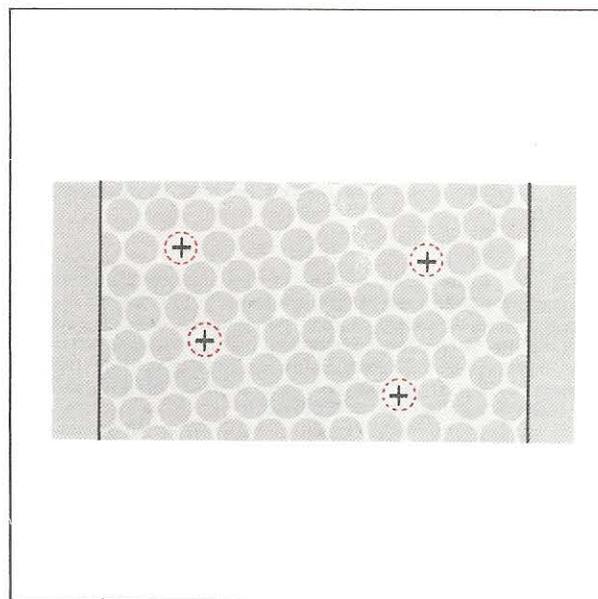
Les *semiconducteurs électroniques* sont par contre d'une importance capitale dans tous les domaines de l'électronique. Il existe des semiconducteurs dont la conductivité est due, comme dans le cas des métaux, aux électrons libres, avec cette différence toutefois que ceux-ci y sont beaucoup moins nombreux.

6



8

7



Ce groupe de semiconducteurs électroniques est appelé "groupe de semiconducteurs de type n" (n = négatif). Mais il existe également des semiconducteurs dont la conductivité provient d'un manque d'électrons. Les électrons manquants constituent des trous dans une série d'électrons qui sont fortement liés aux atomes du semiconducteur et ne peuvent de ce fait participer à la conduction électrique. Dans le langage technique, on appelle simplement "trous" les électrons manquants. Comme l'espace voisin d'un trou est fortement peuplé d'électrons et par conséquent négatif, le trou est quant à lui positif. A un tel trou correspond exactement un seul électron, et par suite la charge électrique du trou est égale à la charge élémentaire de l'électron mais de signe positif. Le trou représente le déficit de charge d'un seul électron. Les semiconducteurs dont la conductivité est provoquée par des trous sont appelés *semiconducteurs de type p* (p = positif). On peut aussi parler de "conducteurs à trous".

Il n'est d'ailleurs pas exact de dire que les semiconducteurs de type n ne recèlent que des électrons et les semiconducteurs de type p exclusivement des trous. Outre ses électrons libres, un semiconducteur n possède également des trous mais en nombre tellement minoritaire que ceux-ci ne contribuent pratiquement pas à sa conductivité. Inversement, un semiconducteur p possède également des électrons libres mais ici en minorité, de sorte qu'ils n'influencent sa conductivité que d'une manière négligeable.

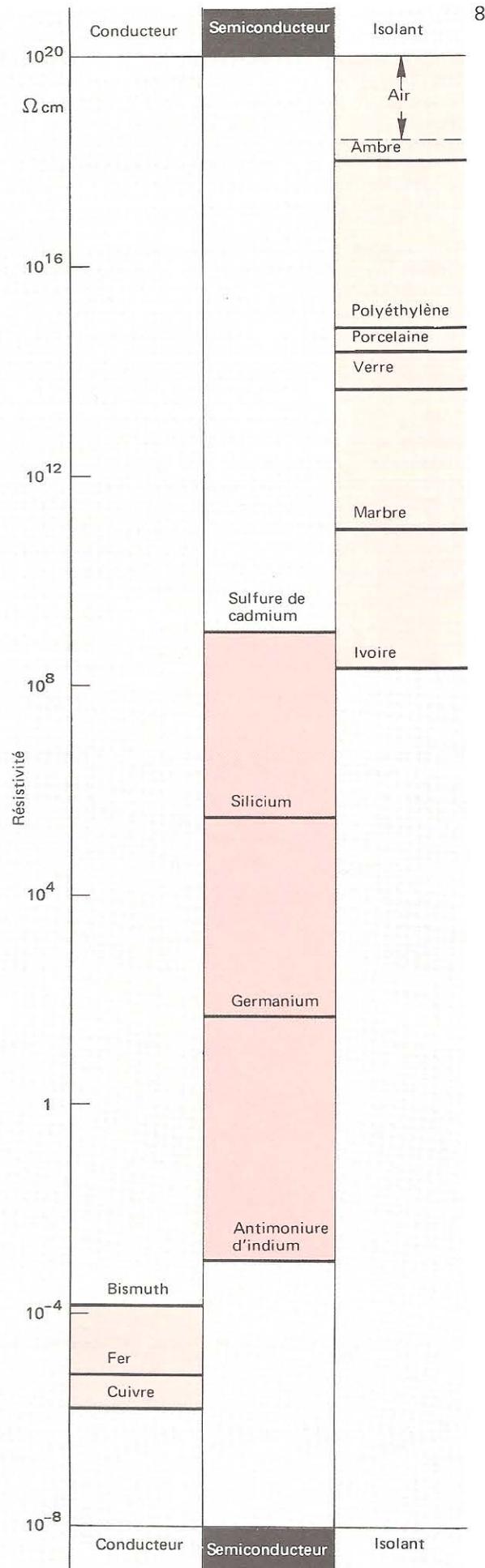
Déplacement des trous

Si l'on suppose que les trous des semiconducteurs p ont la propriété de transporter une charge électrique, et donc de contribuer à une conduction de type p, il faut admettre qu'ils peuvent se déplacer. Mais comment cela peut-il se produire alors que chaque trou est étroitement entouré d'une "troupe" d'électrons immobiles? Pour expliquer le mouvement des trous, nous aurons recours à

Fig. 6 Avec l'élévation de la température, la résistance des métaux devient plus forte, mais la résistance des métalloïdes (semiconducteurs, isolants, etc.) diminue.

Fig. 7 Les brèches entre l'essaim pressé des électrons négatifs constituent les trous; par rapport à leur environnement, ils représentent un manque d'électrons et portent par conséquent une charge électrique positive.

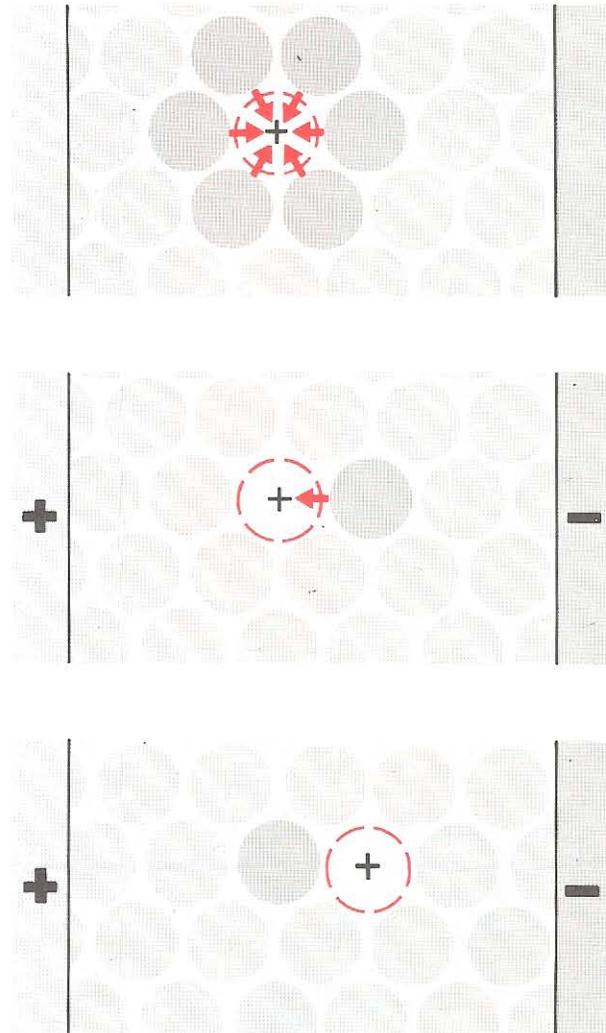
Fig. 8 Résistance spécifique de conducteurs électriques, de semiconducteurs et d'isolants à la température de 20 °C.



un exemple que nous offre notre vie quotidienne motorisée: la file des automobiles à l'arrêt. Lorsque le premier véhicule avance, un trou se forme derrière lui, qui est comblé par le deuxième véhicule au bout du temps de réaction de démarrage de celui-ci. Ce processus se renouvelle entre chaque voiture de la file et l'observateur immobile voit le "trou" se déplacer, en sens inverse du sens de marche, jusqu'à l'extrémité de la file de voitures, et ce mouvement se poursuit alors que les premiers véhicules sont de nouveau arrêtés.

Cet exemple nous montre que les trous peuvent se déplacer dans un semiconducteur; leur déplacement peut être aussi bien provoqué par l'influence des fluctuations de température que par l'effet d'une tension électrique. Ce qui est essentiel, c'est le changement de place qu'effectue l'électron voisin du trou: il échappe alors à l'attraction de l'atome, remplit le trou et laisse derrière lui un nouveau trou. Sous l'influence des vibrations de l'atome, chaque électron voisin du trou est capable de prendre la place de celui-ci. Cela signifie que le sens du changement de place vers le trou est indifférent, comme représenté figure 11 par des flèches d'égale longueur. Donc, dans un semiconducteur, les trous effectuent des mouvements désordonnés comparables à ceux des électrons de conduction dans les métaux, aussi longtemps qu'une tension extérieure n'est pas appliquée. Par contre, sous l'influence d'une tension, la direction du

Fig. 11 Un électron voisin du trou prend la place de celui-ci, selon la loi du hasard, en l'absence de tension appliquée au semiconducteur. Sous l'influence d'une tension électrique, c'est l'électron côté négatif qui est favorisé et qui prend la place du trou (flèche vers



changement de place des électrons est favorisée dans le sens conduisant au pôle positif. De cette manière, lorsqu'un électron voisin favorisé prend la place du trou, celui-ci, en tant que charge positive, est simultanément repoussé à la place qu'occupait l'électron, c'est-à-dire en direction du pôle négatif. Cette permutation de place se répète sans cesse, de sorte que les trous, sous l'influence de la tension, se déplacent vers le pôle négatif.

- Il existe deux types de semiconducteurs électroniques: les semiconducteurs p et les semiconducteurs n.
- Dans un semiconducteur p, la conduction électrique par trous prédomine. Dans un semiconducteur n, celle par électrons l'emporte.
- Le déplacement des trous résulte du déplacement par bonds des électrons.
- Sous l'influence d'une tension appliquée au semiconducteur, les électrons de conduction se déplacent vers le pôle positif et les trous vers le pôle négatif. Le sens du courant de trous correspond au sens conventionnel du courant.

la gauche). Au changement de place de l'électron favorisé, le trou se déplace vers le pôle négatif.

Fig. 12 La conductivité du semiconducteur n dépend des électrons de conduction.

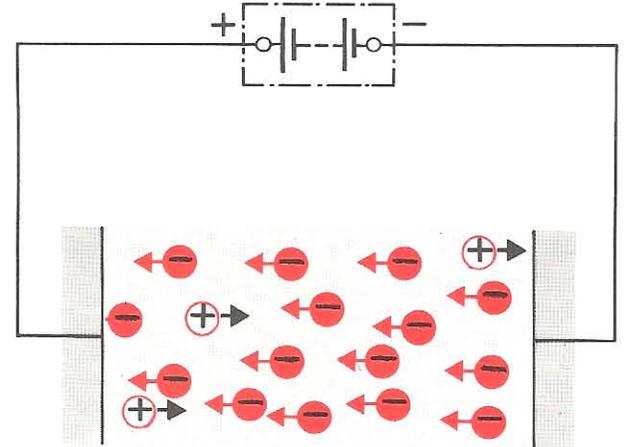
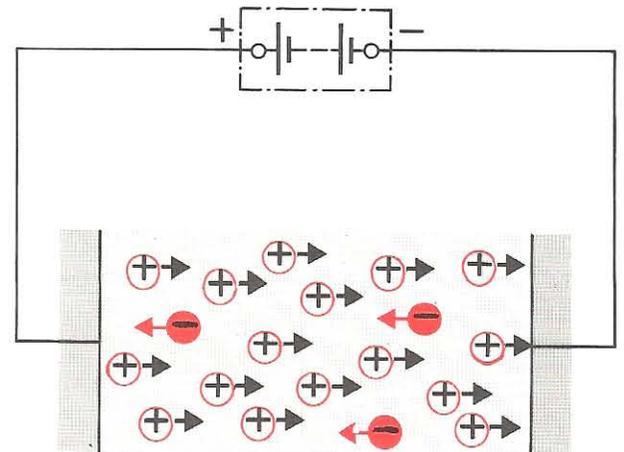


Fig. 13 Les trous déterminent la conductivité du semiconducteur p.



Semiconducteurs utilisés en électronique appliquée

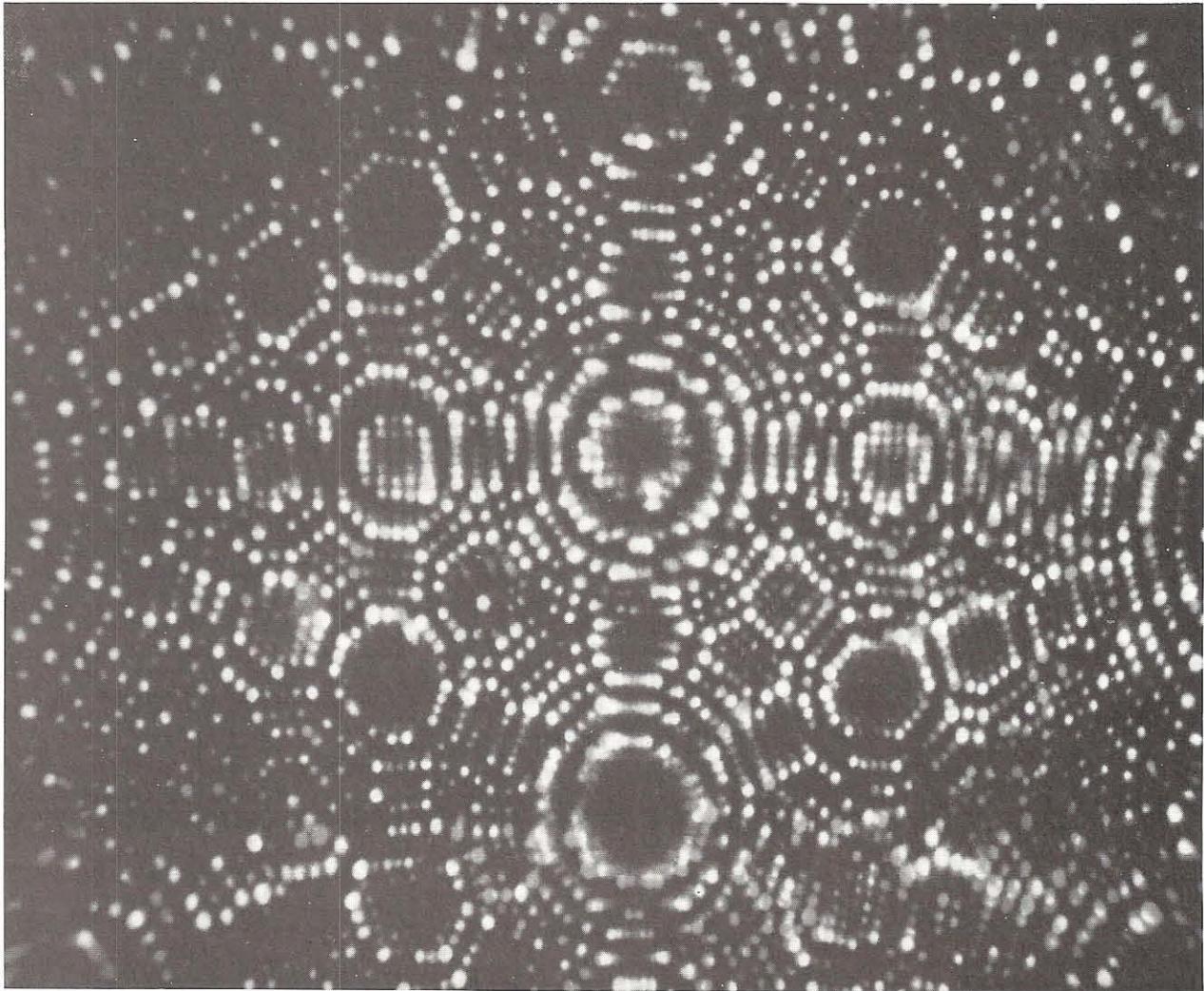
Les matériaux semiconducteurs sont actuellement disponibles en grand nombre et il y en a toujours de nouveaux qui nous sont proposés. Les semiconducteurs synthétiques suscitent un intérêt tout particulier. Cependant, en électronique, les semiconducteurs au *germanium* et au *silicium* revêtent une importance capitale.

Le germanium extrêmement pur conduit relativement mal le courant électrique; le silicium extrêmement pur le conduit encore plus mal car il a des propriétés quasi isolantes ainsi que le montre la figure 8. Cette sorte de conductivité est nommée *conductivité intrinsèque*. Si l'on ajoute aux semiconducteurs extrêmement purs de cette catégorie des traces d'un corps étranger, de l'arsenic par exemple, leur conductivité s'élève brusquement. Les traces d'arsenic apportent un excédent d'électrons. Le germanium et le silicium "pollués" par de l'arsenic deviennent donc ainsi des semiconducteurs du type n. Si l'on ajoute au semiconducteur pur des traces d'un autre corps, par exemple de l'indium, il se produit un manque d'électrons qui améliore également la conductivité: le semiconducteur a été transformé en semiconducteur du type p. L'apport d'un corps étranger est appelé *dopage*. Le taux de dopage est le rapport de la masse du corps dopeur à la masse du corps dopé. Il faut remarquer que l'on peut, par dopage, régler la conduc-

tivité avec une très grande précision à l'intérieur de larges limites. Chaque atome d'arsenic incorporé au germanium n augmente d'un électron supplémentaire le nombre des électrons de conduction, et chaque atome d'indium incorporé au germanium p augmente d'un trou supplémentaire le nombre des trous de conduction de ce semiconducteur. L'exemple chiffré suivant montre clairement quelle quantité infime d'impuretés il suffit d'employer pour obtenir, par dopage du germanium ou du silicium, des semiconducteurs n ou p satisfaisants. Un apport de 0,000 001 % d'arsenic ou d'indium multiplie par 200 la conductivité du semiconducteur. Dans cet exemple, pour 100 millions d'atomes de germanium on a un seul atome du corps étranger. Cet exemple permet de se faire une idée de l'importance que revêt la fabrication d'un matériau initial d'une pureté quasi absolue et la réalisation d'un dopage aussi précis que possible. Ces deux étapes de la fabrication sont non seulement les plus importantes mais aussi les plus difficiles entre toutes celles qu'exige la réalisation complète du semiconducteur. De gros efforts ont été nécessaires durant de nombreuses années pour maîtriser cette technique de fabrication.

La multiplicité des composants à semiconducteurs et la diversité de leur domaine d'application repose essentiellement, sur des combinaisons de semiconducteurs n et de semiconducteurs p. Le taux de dopage de ceux-ci peut être très différent.

Fig. 14 Cliché d'une surface métallique vue au microscope à champ ionique. Ce microscope, parent du microscope électronique, a un pouvoir grossissant si fort qu'on peut distinguer les atomes les uns des autres. Remarquez la régularité de leur disposition.



Conduction électrique et structure atomique

Généralités sur la structure atomique

L'aptitude d'un métal à conduire le courant électrique est étroitement liée à sa structure atomique. La structure individuelle de l'atome ainsi que l'action réciproque qu'exercent les atomes les uns sur les autres sont ici déterminantes. Toutes les questions relatives à la nature de l'électricité débouchent finalement sur les éléments constitutifs de la matière — c'est-à-dire sur les atomes. C'est pourquoi nous nous proposons de faire un rapprochement entre l'atome et l'électronique.

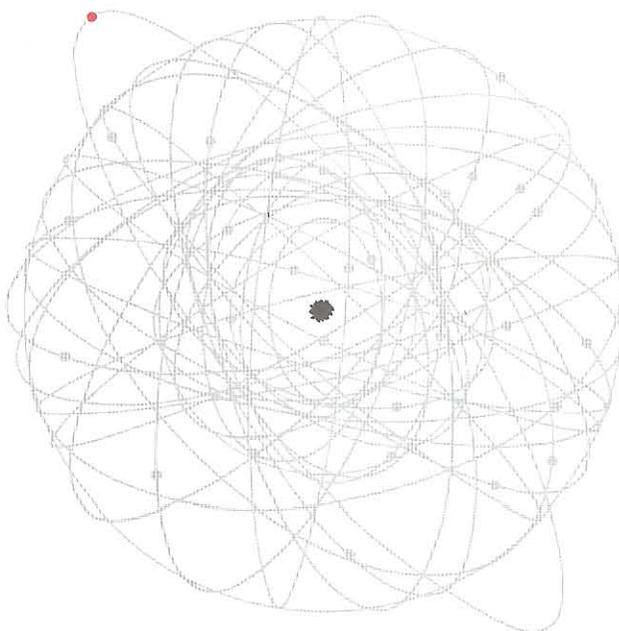
Du fait de leur extrême petitesse, les éléments constitutifs de l'atome ne sont pas visibles, même à l'aide des microscopes les plus puissants. On doit donc avoir recours à une représentation figurée. Le modèle d'atome de *Niels Bohr* affecte la structure d'un système planétaire miniature. Le point central de l'atome, qui est d'ailleurs en même temps son propre centre de gravité, se confond avec le noyau de l'atome autour duquel gravitent les électrons à la vitesse de 2 000 km/s. Les électrons sont donc en permanence attirés électriquement par le noyau, et cette attraction est d'autant plus forte qu'ils se trouvent plus rapprochés du noyau. L'attraction électrique en direction du noyau et la force

centrifuge de sens opposé assurent le maintien de l'équilibre. Comme les électrons sont chargés négativement, leur attraction par le noyau implique que celui-ci soit positif. Les porteurs de la charge du noyau sont les protons. Le proton possède une unique charge élémentaire positive. Au nombre de protons qui se trouvent dans le noyau de l'atome correspond le même nombre d'électrons gravitant dans l'atome. Ainsi, par exemple, autour du noyau de l'atome de cuivre qui possède 29 protons, gravitent 29 électrons. Le noyau de l'atome est en quelque sorte entouré d'un nuage d'électrons dont la charge négative totale est égale en valeur absolue à la charge positive du noyau. En conséquence, vu de l'extérieur, l'atome est électriquement neutre. Comme les électrons qui gravitent dans la couche extérieure sont les moins fortement liés à l'atome, il arrive que certains d'entre eux se perdent, parfois sous l'effet d'une collision avec un électron libre animé d'une vitesse élevée (choc électronique). La charge positive du noyau prédomine alors; l'atome est devenu un ion positif. Au contraire, un électron libre peut être capté en supplément par le nuage d'électrons, ce qui ne se produit toutefois que rarement. Dans ce cas, la charge négative du nuage d'électrons prédomine: l'atome est devenu un ion négatif.

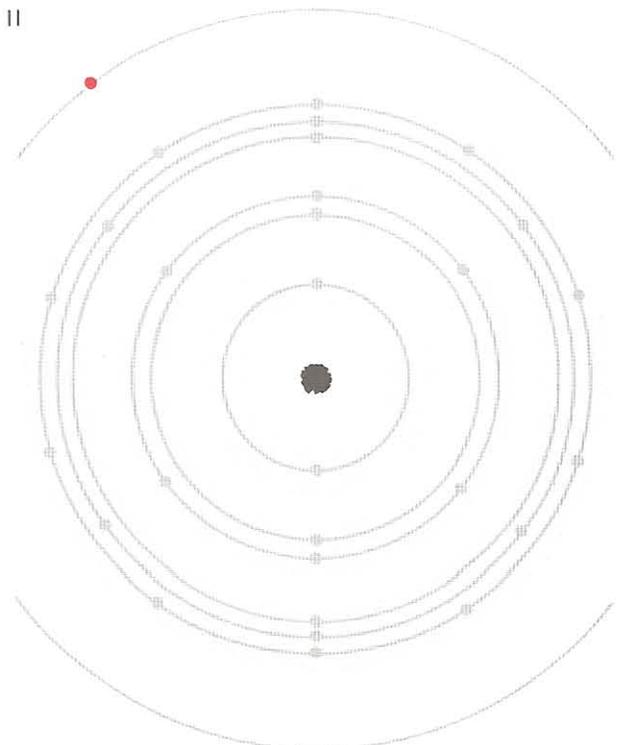
Tandis que le nuage d'électrons, pour graviter autour du noyau de l'atome, requiert relativement beaucoup de place, les protons sont extrêmement serrés dans le noyau. A cause de leur charge positive, ils devraient en fait se repousser mutuellement; le noyau ne devrait pas se constituer. Mais on observe que les protons, malgré la répulsion électrique, demeurent ensemble. En conséquence, de puissantes forces d'attraction existent dans le noyau, pour lesquelles les notions que nous avons de l'attraction et de la répulsion électriques ne sont plus adaptées. Ces forces nucléaires — connues en général sous le nom de "force atomique" — sont celles que l'Homme s'efforce de domestiquer depuis des dizaines

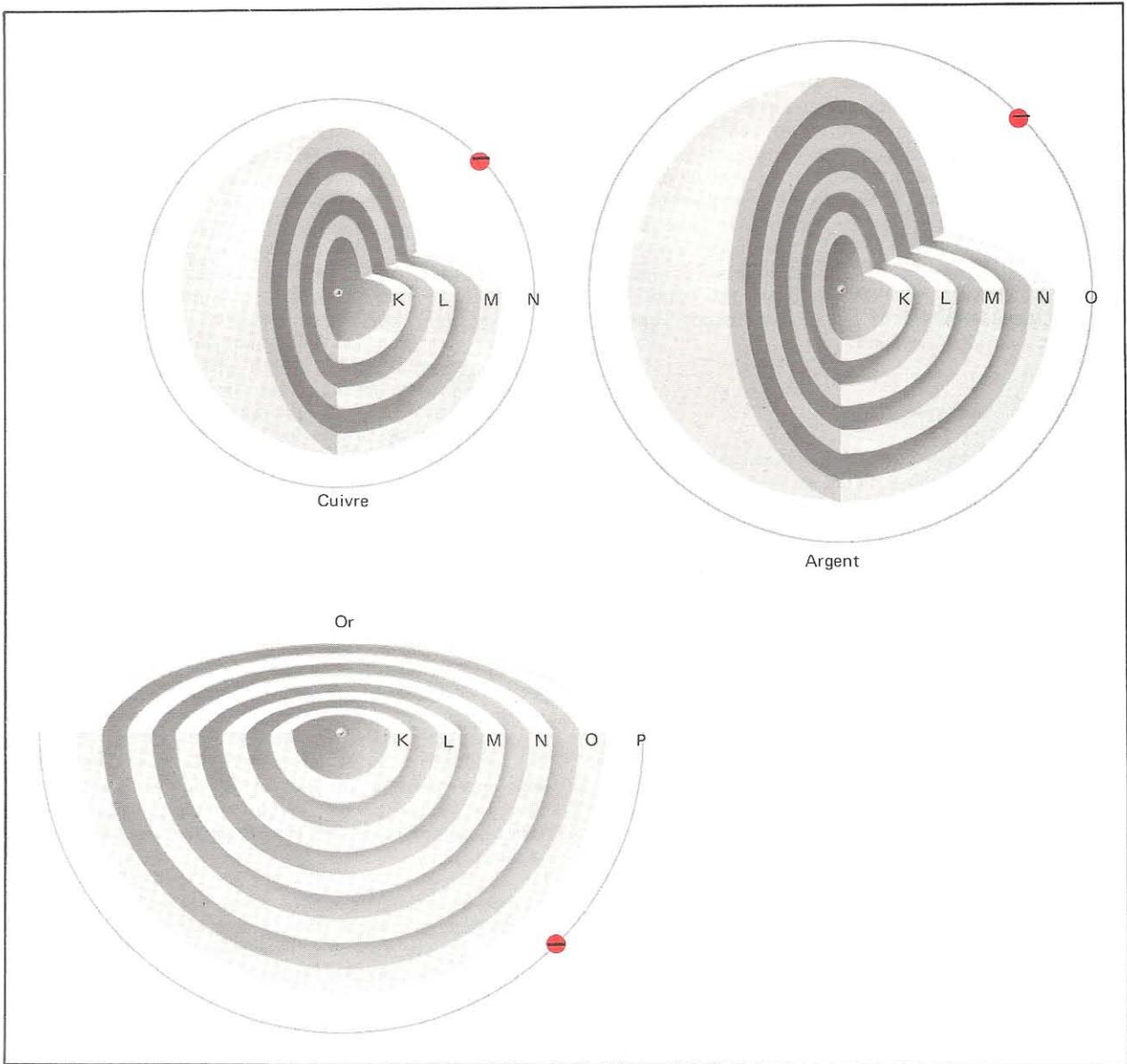
Fig. 15 Modèle d'atome de cuivre d'après Bohr:
I) représenté dans l'espace. II) représenté en plan. 29 électrons gravitent sur des orbites différentes autour du noyau de l'atome de cuivre.

I



II





d'années. On a découvert que le noyau atomique n'est pas constitué seulement de protons mais qu'il comporte aussi des neutrons qui en assurent la cohésion. Les neutrons sont en quelque sorte le "ciment" du noyau. Par exemple, le noyau de l'atome de cuivre renferme 34 ou 36 neutrons en plus de ses 29 protons. Si l'on voulait, par bombardement nucléaire, chasser les neutrons ou au contraire en introduire de nouveaux, le noyau perdrait sa stabilité et deviendrait radioactif. Les neutrons possèdent bien une masse, mais aucune charge électrique. Comme leur nom l'indique, ils sont électriquement neutres.

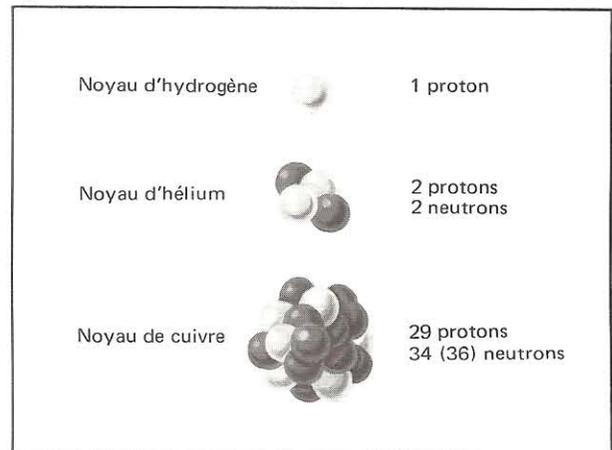
La masse de l'atome, que l'on nomme aussi à tort "poids atomique", est essentiellement déterminée par la masse du noyau. Le proton et le neutron sont beaucoup plus "lourds" que l'électron:

masse du proton = masse du neutron = masse de 1837 électrons.

Il est difficile de se représenter le rapport des grandeurs du nuage d'électrons et du noyau atomique. Si nous convenons de donner au noyau atomique la grosseur d'un petit pois, les électrons ont par comparaison la grosseur d'une tête d'épingle et gravitent autour du noyau à une distance de 300 mètres.

Fig. 16 Autres représentations d'atomes: atome de cuivre, d'argent et d'or (en coupe). Cette figure montre la structure particulière en couches du nuage d'électrons. Les électrons appartenant à une même couche ne sont pas représentés ici — comme habituellement — sous forme de petites billes ou de charges ponctuelles mais comme un nuage de charge enveloppant le noyau à la façon d'une coquille. L'électron isolé de la couche externe est par contre représenté en rouge, de la manière habituelle, comme une charge ponctuelle négative, afin de mettre en évidence sa situation particulière d'électron de conduction.

Fig. 17 Noyau atomique d'hydrogène, d'hélium et de cuivre



Le diamètre de l'atome serait donc alors de 600 mètres. En réalité ce diamètre est si petit que sur une longueur de 1 mm trois millions d'atomes environ pourraient prendre place les uns à côté des autres. La distance relative séparant du noyau les électrons en gravitation montre clairement que la matière est remplie d'un vide béant. Un cm³ de matière constituant le noyau pèserait 100 millions de tonnes à la surface de la terre, et 1 cm³ de masse d'électrons 10 000 tonnes "seulement". En comparaison les matériaux constitutifs de la terre sont biens légers. Pour 1 cm³: eau 1 g, pierre 2 à 3 g, cuivre 9 g, plomb 11 g, platine 21 g. C'est pourquoi il n'est pas du tout étonnant que les électrons de conduction puissent traverser aisément les métaux "lourds", comme le cuivre, le plomb, le platine.

Conducteurs métalliques

Tous les phénomènes liés à la conduction électrique se déroulent à la périphérie même du nuage d'électrons et entre les atomes. Les électrons des couches internes et le noyau atomique n'y jouent aucun rôle. La structure du nuage d'électrons présente une étonnante régularité: les électrons se déplacent sur des trajectoires fixes obéissant à une loi naturelle; entre ces trajectoires, il n'est pas d'autres trajectoires possibles. Les trajectoires, qui sont extraordinairement proches les unes des autres, constituent avec les électrons leur appartenant une "couche d'électrons". Les trajectoires et les couches ne peuvent accueillir qu'un nombre limité d'électrons; des électrons supplémentaires ne peuvent se loger que là où il existe de la place, c'est-à-dire, en règle générale, à l'extérieur. Ainsi, comme on le montre en II de la figure 15, la couche K, la plus proche du noyau, ne peut accueillir que 2 électrons sur une trajectoire unique. La couche K est suivie par la couche L avec 8 électrons au maximum sur 2 trajectoires, puis la couche M avec 18 électrons au maximum sur 3 trajectoires. La structure en couches du nuage d'électrons des 92 éléments chimiques existant dans la nature peut être représentée par un schéma électronique. Nous donnons ici en exemple le schéma

électronique de l'atome de trois métaux remarquables par leur conductivité exceptionnelle, le cuivre, l'argent et l'or.

D'après ce schéma, l'atome de cuivre comprend trois couches saturées d'électrons, l'atome d'or 4. Ces trois sortes d'atomes ont ceci de commun: leur couche externe comporte un seul électron, particularité d'importance primordiale pour la conduction électrique. Les électrons de la couche K sont soumis à l'attraction maximum du noyau; ce sont eux par conséquent qui sont le plus liés à l'atome. L'attraction est d'autant moins forte que les électrons sont plus éloignés du noyau. En conséquence, l'électron isolé de la couche externe n'est que très faiblement lié à l'atome et oscille dans le métal presque comme l'électron de conduction libre (EC) à travers la texture du métal. Ainsi, l'électron de conduction a cessé d'appartenir à un atome déterminé. Partant de ce fait, les atomes au sein du métal ne sont pas des atomes électriquement neutres, mais des ions positifs; ils sont reliés ensemble par les forces de cohésion du métal.

Aussi longtemps qu'aucune tension extérieure n'est appliquée, les électrons de conduction traversent le métal dans un mouvement oscillant désordonné. Le mouvement n'est orienté dans aucune direction déterminée. Par contre, sous l'influence d'une tension, les électrons sont soumis en plus à un mouvement dirigé qui les fait se déplacer suivant une trajectoire en zigzag vers le pôle positif. La haute conductivité électrique des métaux tient avant tout au nombre énorme d'électrons de conduction qu'ils comportent. Ceux-ci déterminent non seulement la conductivité électrique mais encore diverses autres caractéristiques typiques des métaux, telles que la conductivité thermique, la couleur, l'éclat et la dureté.

Le fer, le cobalt, le nickel, le zinc et autres métaux ne conduisent pas aussi bien le courant électrique que le cuivre, l'argent ou l'or, car leurs électrons de conduction ne se déplacent pas aussi librement.

Sorte d'atome	Symbole chimique	Quantité d'électrons ou de protons	Quantité d'électrons par couche					
			K	L	M	N	O	P
Cuivre	Cu	29	2	8	18	1 EC		
Argent	Ag	47	2	8	18	18	1 EC	
Or	Au	79	2	8	18	32	18	1 EC
Silicium	Si	14	2	8	4 EV			
Germanium	Ge	32	2	8	18	4 EV		

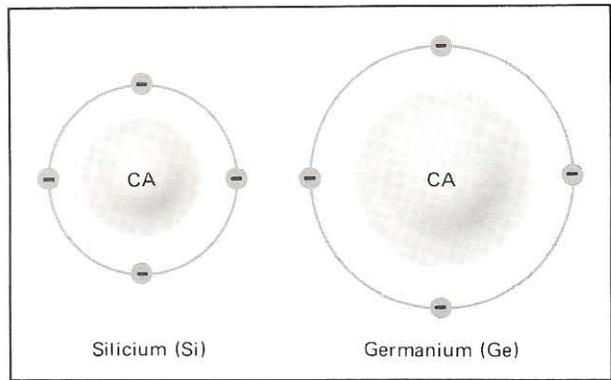
Semiconducteurs électroniques

Les semiconducteurs occupent une place particulière entre les conducteurs et les isolants, Leurs représentants les plus importants sont le silicium et le germanium. Considérons d'abord le schéma électronique des deux sortes d'atomes et portons directement notre attention sur les électrons de la couche externe. Ceux-ci sont seuls responsables de toutes les propriétés du corps considéré; leur nombre exprime la *valence* chimique du corps. Les atomes de silicium et de germanium ont quatre électrons extérieurs et sont par conséquent tétravalents. On appelle aussi *électrons de valence* (EV) les électrons de la couche externe. Le reste de l'atome, comprenant le noyau atomique et le nuage électronique des couches complètes, constitue la partie invariable de l'atome que nous appellerons par la suite "corps de l'atome". On pourrait être tenté de supposer que la conductivité électrique du silicium et du germanium est supérieure à celle du cuivre, de l'argent et de l'or, car la couche externe de leur atome possède non pas un seul électron mais bien quatre. En fait, il s'agit du contraire: les quatre électrons de covalence du silicium et du germanium demeurent relativement bien reliés au corps de l'atome. De plus, ils déterminent entre les corps d'atomes une solide liaison appelée *liaison de covalence*. C'est à celle-ci que le semiconducteur doit non seulement sa grande rigidité mais encore l'ordre étonnant qui régit la disposition de ses atomes dans le cristal. Le silicium et le germanium sont donc par conséquent des *semiconducteurs de covalence* caractérisés.

- Les électrons de valence sont les électrons de la couche externe d'un atome.
- La valence d'un atome exprime le nombre de possibilités de liaison de cet atome avec d'autres atomes.
- Tout atome de silicium ou de germanium a 4 électrons de valence; ces deux atomes sont donc tétravalents.

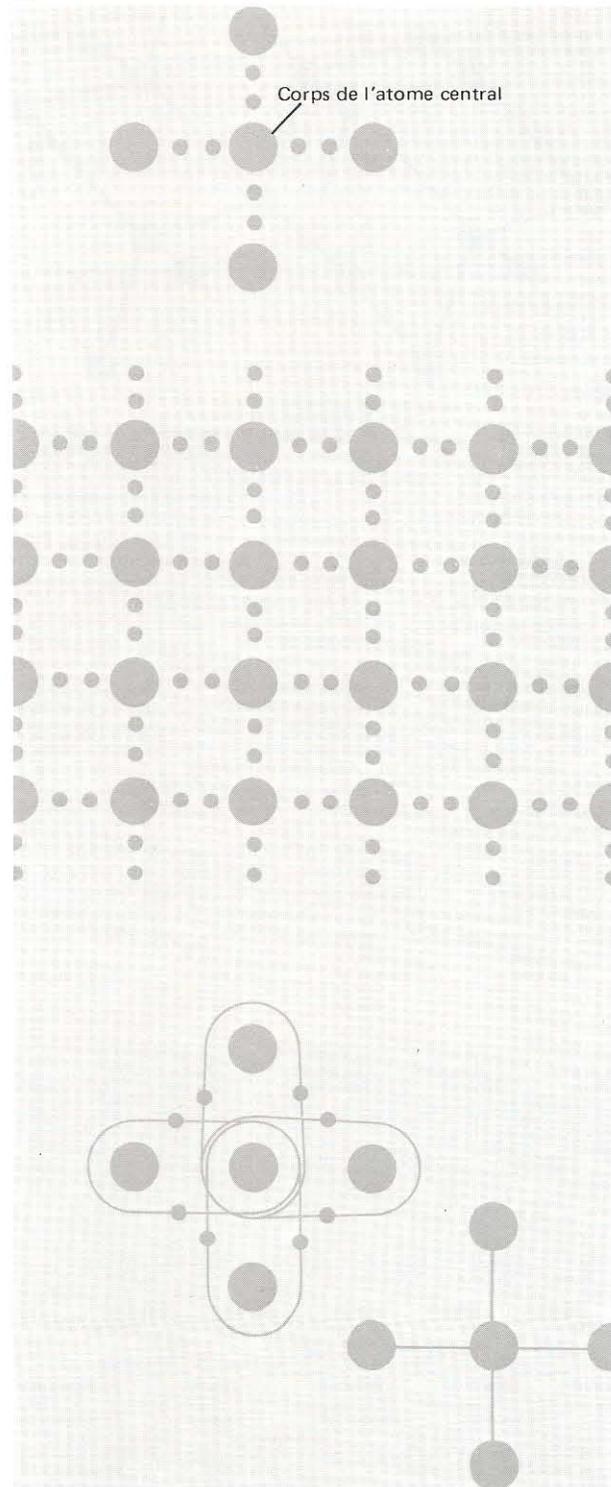
Fig. 18 Représentation d'un atome de silicium et d'un atome de germanium. CA = corps d'atome comprenant le noyau atomique et les couches internes complètes d'électrons.

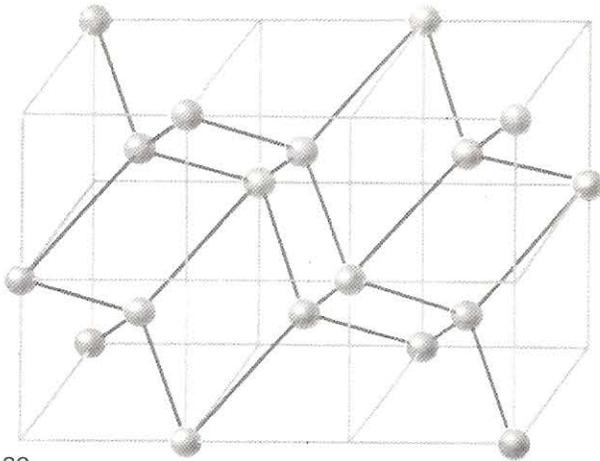
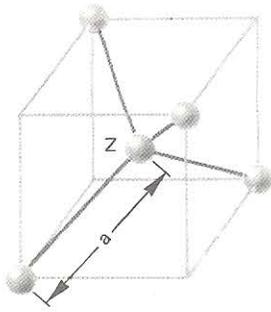
Fig. 19 Dans le silicium ou le germanium chaque atome possède autour de lui, comme voisins immédiats, 4 atomes de même espèce. Entre deux corps d'atomes voisins se trouvent deux électrons de valence, constituant pour ainsi dire des ponts de liaison; en conséquence, chaque corps d'atome est environné au total de 8 électrons de valence formant quatre paires. Les corps d'atome sont si proches les uns des autres que les couches externes des nuages d'électrons s'interpénètrent. Ici, chaque paire d'électrons de valence de deux corps d'atome gravite sur une trajectoire commune. Ainsi, les électrons de valence sont échangés à une cadence très rapide entre les corps d'atome du cristal semiconducteur. Il apparaît donc des forces d'attraction qui conduisent à une liaison de covalence, et par conséquent à une structure cristalline exactement déterminée. La trajectoire des électrons autour de deux corps d'atomes voisins affecte la forme d'une boucle solide, représentée simplifiée par le "trait de covalence" en bas à droite.



18

19



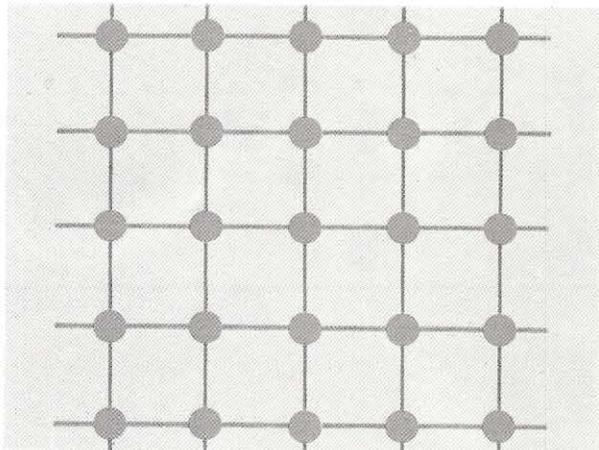


20

Fig. 20 et 21 Le silicium et le germanium ont la même structure cristalline que le diamant. Les quatre atomes voisins s'ordonnent dans l'espace de telle sorte qu'ils occupent les angles opposés d'un cube imaginaire; l'atome central (Z) est exactement au centre du cube. L'écartement des atomes (a) correspond à l'écartement moyen entre deux noyaux atomiques voisins. Pour le silicium et le germanium, $a \approx 2,4$ angströms, soit 0,000 000 24 mm. Le trait de liaison entre les corps d'atomes voisins symbolise d'une manière simple la trajectoire des paires d'électrons de valence et par là même les liaisons de covalence. L'ensemble de l'édifice cristallin est composé de cellules cubiques semblables à celle que nous avons décrite, les cellules avec atome central et les cellules sans atome central étant alternées. L'ensemble se présente sous l'aspect d'un treillis d'atomes du type diamant dont la disposition est d'une extrême régularité. C'est la raison pour laquelle une telle formation reçoit aussi le nom de *réseau cristallin*. Afin de simplifier la figure et de la rendre plus claire, on renonce à représenter le réseau cristallin dans l'espace et l'on se contente d'une représentation schématique plane (fig. 21).

Dans tout cristal naturel, de même que dans le silicium et le germanium utilisés en électronique appliquée, des défauts de cristallisation et la présence d'impuretés viennent fréquemment troubler la parfaite disposition des atomes. De telles différences par rapport au cristal idéal sont parfois souhaitées, parfois indésirables.

21



16

Conduction intrinsèque

Nous savons maintenant que tous les électrons de valence ont pour rôle, en créant la liaison de covalence, de maintenir la cohésion et l'ordre dans le cristal semi-conducteur. Il n'y a donc pas d'électrons libres disponibles pour assurer la conduction électrique. Le germanium et le silicium devraient être par conséquent totalement non conducteurs. Mais ceci n'est vrai que lorsqu'on les refroidit aux plus basses températures, c'est-à-dire aux températures très voisines du zéro absolu. Au zéro absolu (-273°C), tous les atomes de cristal devraient être en fait figés dans un repos complet à la place où on les a représentés dans les dessins précédents. Aussitôt que la matière s'échauffe, les atomes se mettent à vibrer dans toutes les directions autour de la position de repos, et cela d'autant plus intensément que la température est plus élevée. La température s'élevant, il arrive fréquemment que la liaison de covalence se rompe et que les électrons de valence soient projetés hors de leur trajectoire. Ces électrons se déplacent alors comme des électrons de conduction libres dans le semi-conducteur. L'électron qui s'est libéré a laissé derrière lui, à la place d'où il s'est arraché, un trou qui se déplace lui-même dans le réseau cristallin en tant que charge positive mobile. Nous constatons donc les phénomènes suivants.

Lorsqu'un électron de valence se libère de la liaison du réseau cristallin, une paire électron-trou est créée, qui se scinde immédiatement après son apparition. La formation de la paire électron-trou est représentée figure 22 (Pa). Comme les électrons de conduction dans le métal, les électrons et les trous se déplacent dans le cristal semi-conducteur suivant un parcours en zigzag.

Lorsque la température du cristal s'accroît, la création de paires électron-trou s'intensifie très rapidement et ainsi le nombre des porteurs de charge augmente considérablement. Suivant le diagramme, à la température ambiante, il existe déjà 10 milliards de paires de porteurs de charge au cm^3 dans le silicium et 1000 fois plus encore dans le germanium. Il s'ensuit que même le plus pur cristal semi-conducteur est faiblement conducteur. Cette propriété de conduction électrique est appelée *conduction intrinsèque* du fait que les porteurs de charge proviennent du propre réseau cristallin du semi-conducteur. Comme la génération des paires est liée à un effet de température, la conduction intrinsèque dépend par conséquent très fortement de la température du cristal. Elle s'élève avec la température. En pratique, la règle empirique suivante est valable:

- la résistivité du silicium et du germanium correspondant à la conduction intrinsèque diminue de moitié lorsqu'on élève de 10° la température du cristal.

Maintenant, il peut se faire que les électrons et les trous se rencontrent au cours de leur déplacement à travers le cristal, et cela d'autant plus fréquemment que leur nombre au cm^3 est plus élevé. Lors de la rencontre, l'électron est "capturé" par le trou et les charges élémentaires de sens opposé s'annulent. Ce phénomène est connu sous le nom de *recombinaison* (Re). Aussi longtemps que la température du semi-conducteur ne varie pas, il apparaît à chaque seconde autant de nouveaux porteurs de charge, par génération de paires, qu'il en disparaît par recombinaison. Autrement dit, le nombre de paires électron-trou, qui est fonction de la température, demeure constant.

L'étroite dépendance de la conduction intrinsèque d'un semi-conducteur vis à vis de la température est utilisée

dans les résistances CTN dont nous reparlerons plus tard. Dans la plupart des cas d'utilisation pratique, la conduction intrinsèque est toutefois indésirable du fait qu'elle se manifeste de plus en plus à mesure que la température s'élève et qu'elle trouble ainsi le fonctionnement de nombreux semiconducteurs, quand elle ne l'entrave pas complètement. C'est pourquoi il n'est pas étonnant que la température de service d'un composant soit limitée vers le haut, en raison principalement de la conductivité intrinsèque du matériau semiconducteur utilisé.

Pourquoi dope-t-on les semiconducteurs?

L'utilisation d'un semiconducteur dans les montages électroniques est conditionnée fondamentalement par la possibilité d'en régler exactement la conductivité et de pouvoir maintenir celle-ci constante dans une gamme de température aussi large que possible. C'est pourquoi, par le procédé de dopage, on transforme le semiconducteur intrinsèque en semiconducteur du type p ou du type n. Il est primordial ici que le semiconducteur qu'on se propose de doper soit d'une pureté quasi absolue. Pour

10 milliards d'atomes de cristal, un seul atome étranger au maximum est admissible. En d'autres termes, 10 000 t de germanium pur ou de silicium pur ne doivent pas contenir plus d'un gramme d'impureté! Depuis 1906 déjà, on a cherché à utiliser le germanium et le silicium en électronique, mais tous les essais ont échoué en raison du fait que ces matériaux ne pouvaient être obtenus au degré de pureté requis. Récemment, les développements de la technique ont permis l'obtention de gros cristaux uniformes, *dits monocristaux*, dont le degré de pureté correspond aux exigences actuelles.

En dopant le germanium ou le silicium, on se trouve devant le choix soit d'accroître le nombre des électrons libres, soit d'accroître le nombre des trous. Dans le domaine des semiconducteurs utilisés en électronique, on a besoin aussi bien de semiconducteurs du type n que de semiconducteurs du type p. Pour obtenir les premiers, on dope le semiconducteur intrinsèque avec un diffuseur d'électrons, ou *donneur*. Les corps étrangers dont l'atome est pentavalent, et qui possèdent par conséquent 5 électrons de covalence (EV), conviennent bien. Citons le phosphore, l'arsenic et l'antimoine.

Fig. 22 Génération d'une paire électron-trou dans un réseau cristallin par rupture de liaison de covalence provoquée par fluctuation de température. Pa = génération de paires.

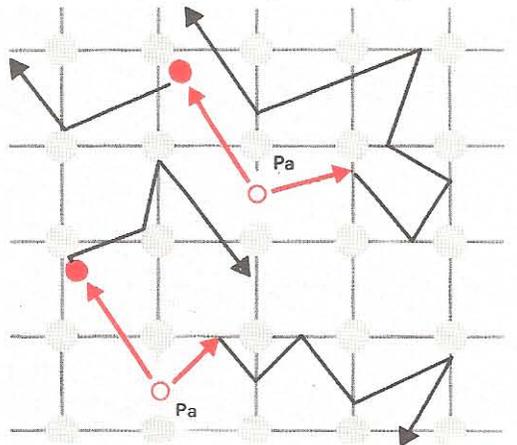


Fig. 23 Le nombre de paires électron-trou augmente lorsque la température du cristal s'élève.

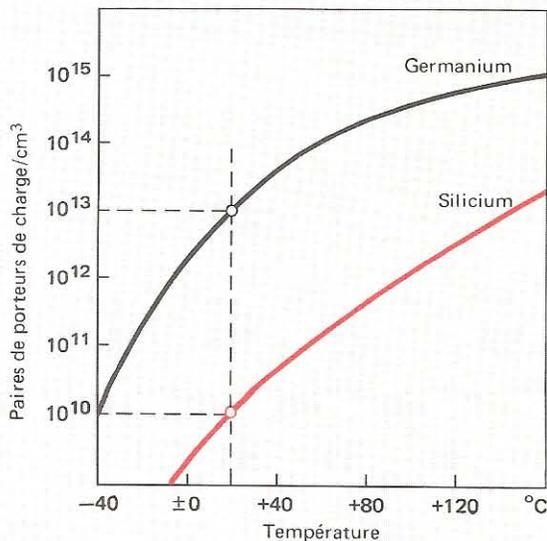


Fig. 24 La recombinaison d'un électron et d'un trou implique la disparition de deux charges élémentaires.

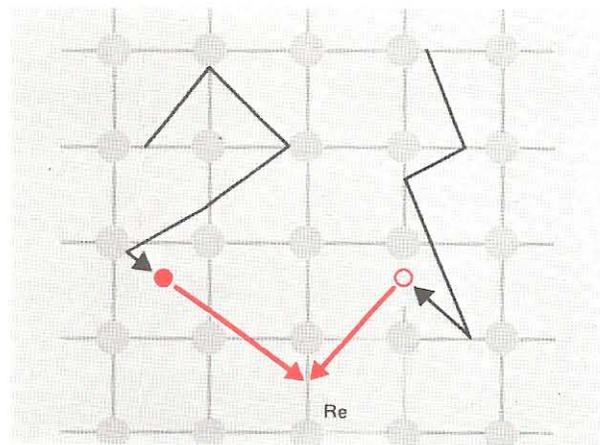
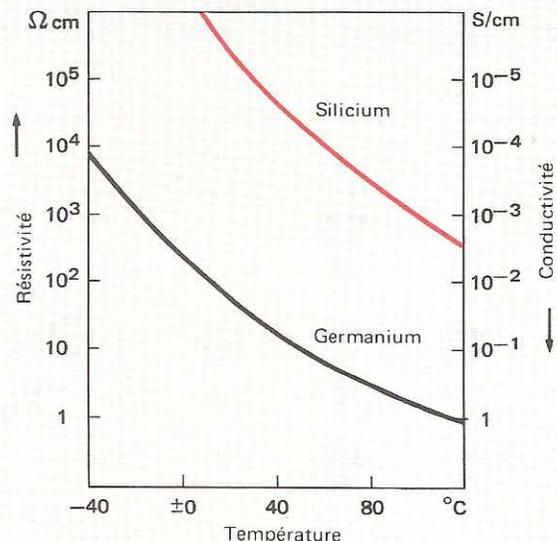


Fig. 25 La résistivité correspondant à la conduction intrinsèque diminue lorsque la température du cristal augmente.



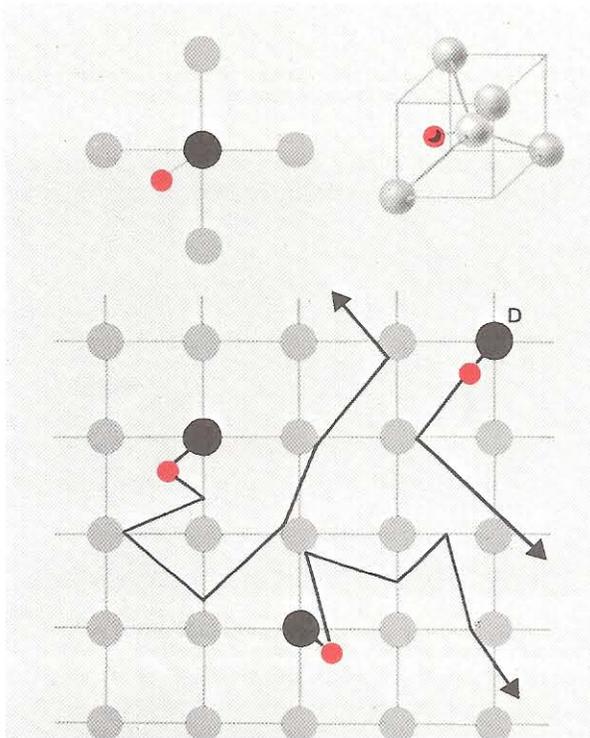
Lorsque des atomes d'un des éléments mentionnés sont introduits dans le réseau cristallin, ils s'y enchâssent, chacun d'eux délogeant un atome de germanium ou de silicium. Le réseau cristallin est perturbé. Mais comme quatre seulement des cinq électrons de valence du donneur sont nécessaires pour assurer la liaison de covalence avec les atomes voisins immédiats, l'électron supplémentaire est disponible pour la conduction électrique: n'ayant plus d'utilité comme électron de valence, il devient électron de conduction. Le donneur lui-même se transforme en ion positif du fait que la charge électrique du noyau est devenue prédominante. Une partie de ces électrons de conduction se recombine avec des trous relevant de la conduction intrinsèque. C'est pourquoi on a prévu un certain surcroît de dopage.

- Chaque atome donneur introduit dans le réseau cristallin est un facteur de perturbation qui augmente d'un électron de conduction le nombre des porteurs de charge préexistants. Le cristal dopé est un semiconducteur de type n.

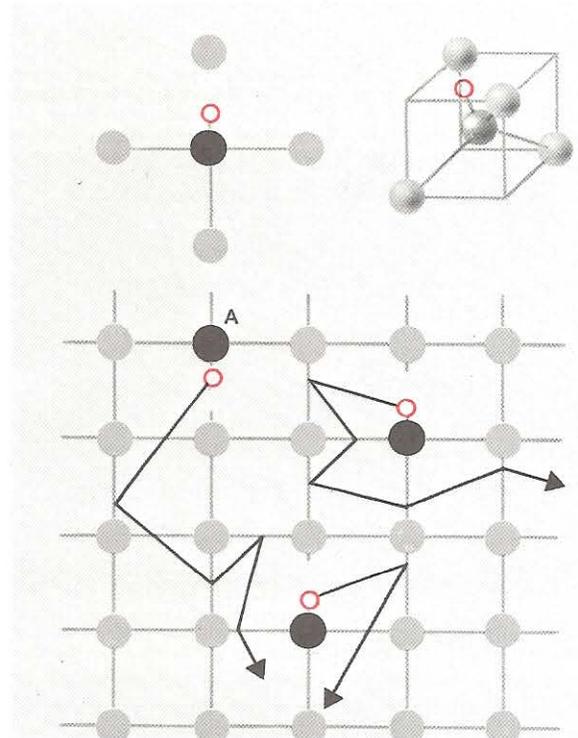
Voyons maintenant le dopage du type p. Vous pouvez deviner combien d'électrons de valence doit posséder le corps étranger pour permettre la création d'un semiconducteur du type p. Il s'agit ici d'éléments trivalents tels que le bore, l'aluminium, le gallium et l'indium. Lorsqu'on introduit des atomes d'un de ces éléments dans le réseau cristallin, des atomes de germanium ou de silicium sont évincés, comme dans le cas précédent. Pour la réalisation d'une liaison de covalence complète avec les 4 atomes voisins, 8 électrons sont ici également nécessaires. Mais 7 seulement sont disponibles, à savoir 3 électrons de l'atome étranger et 1 électron de chacun des quatre atomes voisins. Un électron est donc contraint de graviter autour d'un seul corps d'atome (R_1).

La liaison de covalence entre l'atome étranger A et R_1 est rompue, et le réseau cristallin est par conséquent perturbé. La liaison de covalence manquante équivaut à un défaut de charge négative. L'introduction d'un atome trivalent dans le réseau cristallin d'atomes tétravalents provoque la génération d'un trou positif.

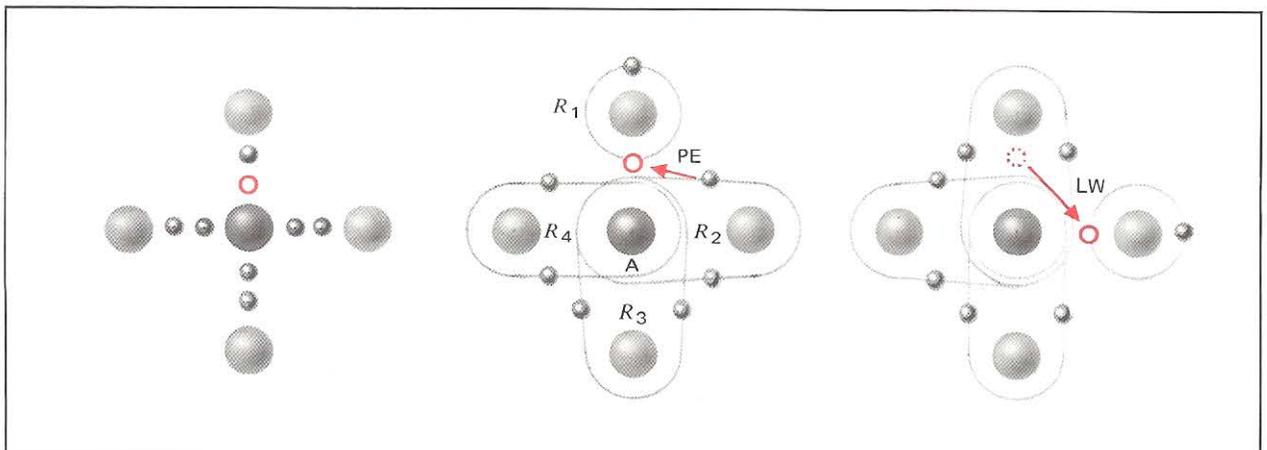
26



27



28



18

Le trou n'est en aucune façon relié à l'atome étranger; au contraire, lorsque le dopage est achevé, il s'échappe de la zone de liaison par une série de permutations avec les électrons de valence du réseau cristallin. L'atome étranger a maintenant acquis une liaison de covalence complète avec les 4 atomes voisins. Pour cela, un électron d'une liaison de cristal normale a dû être emprunté, c'est-à-dire piégé. De tels corps étrangers pouvant donner naissance à un semiconducteur du type p sont, pour cette raison, nommés *accepteurs*. L'atome accepteur lui-même devient un ion négatif du fait que la capture de l'électron nécessaire à la réalisation de la quatrième liaison se traduit par un excès de charge négative par rapport à la charge positive du noyau.

- Chaque atome accepteur introduit dans le réseau cristallin constitue un "défaut" qui augmente d'un trou positif le nombre des porteurs de charge préexistants. Le cristal dopé est un semiconducteur du type p.

Conduction extrinsèque

Nous avons vu que le dopage du germanium et du silicium élève la conductivité de ces corps et que, suivant le taux de dopage, cette conductivité peut varier dans de larges limites. Le semiconducteur reçoit autant de porteurs de charge supplémentaires qu'on y a incorporé d'atomes dopeurs jouant le rôle de défauts dans le cristal. Le dopage est toujours assez fort pour que les paires électron-trou à conduction intrinsèque soient sensiblement minoritaires. Autrement dit, l'accroissement de conductivité provoquée par les défauts doit être considérable par rapport à la conduction intrinsèque. C'est pourquoi la conductivité d'un semiconducteur dopé est pratiquement extrinsèque.

Au zéro absolu ($-273\text{ }^{\circ}\text{C}$), les semiconducteurs dopés, de même que les semiconducteurs non dopés, se comportent comme des isolants parfaits. Mais à partir de $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$, presque tous les porteurs de charge des semiconducteurs dopés sont déjà détachés de leurs atomes extrinsèques et sont disponibles pour assurer la conduction électrique. Il s'ensuit que, dans la gamme de température techniquement intéressante — c'est-à-dire la gamme de température de service s'étendant par exemple de $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ (fig. 33) —, la conduction extrinsèque n'est pratiquement plus influencée par la température du cristal, et ceci d'autant moins que le semiconducteur est plus fortement dopé.

Fig. 26 Le 5^{ème} électron de valence de l'atome donneur D, en surnombre, devient électron de conduction lorsque le dopage est achevé.

Fig. 27 Le dopage du cristal semiconducteur avec des atomes accepteurs fait apparaître des trous et provoque une élévation de la conductivité.

Fig. 28 Trois paires d'électrons gravitent ensemble autour du corps de l'atome accepteur (A) et, par paires, autour des corps des trois atomes voisins (R_2, R_3, R_4). Le 7^{ème} électron isolé tourne autour de R_1 jusqu'à ce qu'un électron de valence voisin prenne la place (PE) du trou et grave de concert avec l'électron auparavant isolé autour des corps d'atomes R_1 et A. Ce changement de place est lié à un déplacement de trous (LW) en sens inverse.

A propos de la conductivité des semiconducteurs

En règle générale, la conductivité d'un matériau dépend de trois grandeurs physiques: le nombre des porteurs de charge au cm^3 (densité des porteurs de charge), la mobilité et la charge élémentaire. Ce qui s'énonce par la formule:

$$K = n \cdot \mu \cdot e$$

K conductivité (S/cm)
 n densité des porteurs de charge ($1/\text{cm}^3$)
 μ mobilité (cm^2/Vs)
 e charge élémentaire (C)

La densité des porteurs de charge dans les semiconducteurs utilisés en électronique appliquée est extrêmement faible en comparaison du nombre des électrons de conduction des métaux; toutefois, elle est, dans tous les cas, si forte que nous ne pouvons nous en faire qu'une idée très vague. Un semiconducteur faiblement dopé renferme déjà au cm^3 100 billions (10^{14}) d'électrons de conduction et de trous. 100 billions de têtes d'épingle étroitement alignées les unes à côté des autres formeraient une ligne pouvant joindre la terre au soleil. 100 billions de gouttes d'eau rempliraient un cube de 200 mètres d'arête. Se reporter au cube représenté figure 3.

Par mobilité, on entend la vitesse communiquée par une tension électrique de 1 volt aux électrons et aux trous se déplaçant sur une longueur de 1 centimètre du réseau cristallin. Dans les semiconducteurs, les électrons ont une mobilité deux ou trois fois supérieure à celle des trous. Voici, à ce sujet, quelques chiffres comparatifs.

Cristal	Mobilité des électrons	Mobilité des trous
Germanium	100 %	50 %
Silicium	35 %	12 %
Cuivre	1 %	

Vous êtes sûrement très étonnés de ce que la mobilité des électrons de conduction du cuivre soit aussi réduite. Cela tient simplement au fait que la densité des électrons de conduction est telle que ceux-ci se heurtent les uns aux autres et se gênent mutuellement dans leur progression.

Comme nous l'avons vu, dans tous les semiconducteurs électroniques, des électrons de conduction et des trous apparaissent simultanément. Il en résulte que les semiconducteurs électroniques sont parcourus par deux sortes de porteurs de charge (bipolarité), tandis que les métaux ne possèdent que des porteurs de charge de même signe (unipolarité). La conductivité totale des semiconducteurs est exprimée par la somme des composantes bipolaires:

$$K = K_n + K_p$$

K_n conductivité due aux électrons
 K_p conductivité due aux trous

Selon la figure 29, pour le dopage de type n, la conductivité due aux électrons prédomine; au contraire, pour le dopage de type p, la conductivité due aux trous est si forte que les porteurs de charge minoritaires ne contribuent pratiquement pas à la conductivité totale. Le cas des semiconducteurs purs, à conduction intrinsèque, est tout à fait différent (voir section "Conduction intrinsèque").

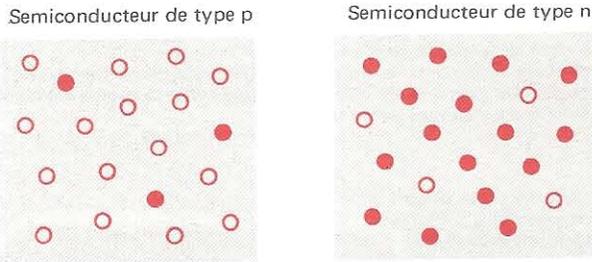


Fig. 29 Les porteurs de charge majoritaires déterminent le type de conduction du semiconducteur dopé. Les porteurs de charge minoritaires relèvent de la conduction intrinsèque.

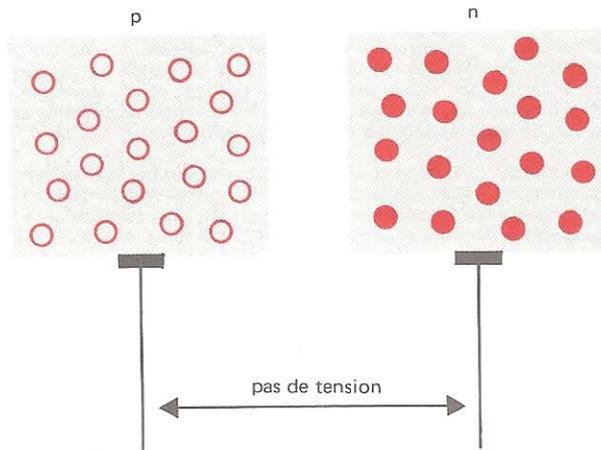


Fig. 30 Lorsqu'ils sont séparés, les semiconducteurs de type p de même que ceux de type n sont en eux-mêmes électriquement neutres. Caractéristique: aucune tension ne règne entre les deux semiconducteurs.

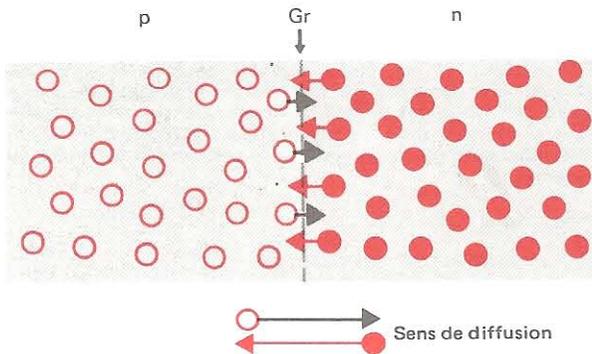
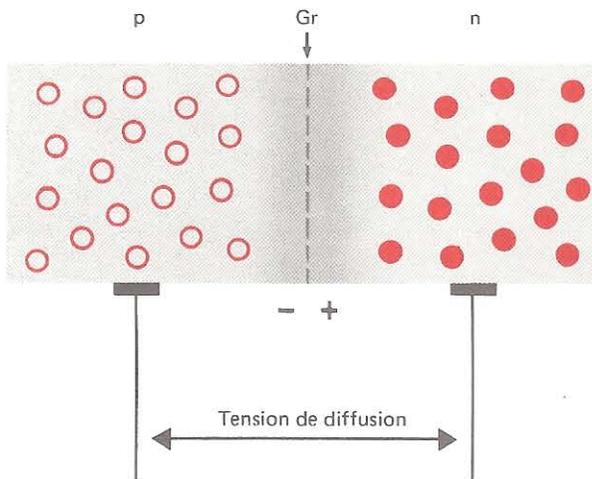


Fig. 31 Lorsqu'un semiconducteur de type p est relié à un semiconducteur de type n, les électrons se diffusent dans le semiconducteur de type p par la surface de séparation (Gr) et les trous dans le semiconducteur de type n.



A la différence de la conduction extrinsèque du semiconducteur dopé, la conduction intrinsèque est très fortement dépendante de la température, ainsi que nous nous sommes attachés à vous le montrer dès le début. Par un taux de dopage approprié, on annule dans une certaine mesure l'effet indésirable de la température sur la conduction intrinsèque. En outre, on doit tenir compte du fait qu'une partie des porteurs de charge provenant du dopage s'annulent en se recombinant avec des porteurs de charge relevant de la conduction intrinsèque, qui sont ainsi perdus pour la conduction. Dans les semiconducteurs du type p, par exemple, des trous se recombinent avec des électrons de conduction intrinsèque. Pour les températures de service élevées, on préfère les semiconducteurs à faible conduction intrinsèque. Sous ce rapport, le silicium est préférable au germanium.

Nous nous souvenons que, par suite de la rupture d'une liaison de covalence, des paires de porteurs de charge produisant une conduction intrinsèque apparaissent dans le cristal. Aussi longtemps que ce phénomène ne se produit pas trop fréquemment, la cohésion de la structure cristalline n'est en aucune manière affectée. Cependant, le risque d'un endommagement de la matière s'accroît avec le nombre des ruptures de liaisons covalentes. Lorsque le semiconducteur est utilisé trop longtemps à une température plus élevée que sa température de service admissible, de nombreux atomes du réseau cristallin perdent leur liaison avec les atomes voisins; ils se libèrent et se déplacent dans les zones intermédiaires du cristal, en direction de la zone froide, comme le montre la figure 34. Il se produit alors un transport de matière connu sous le nom de *diffusion*. Lorsqu'il est soumis à des contraintes thermiques encore plus élevées, le réseau cristallin se brise et le semiconducteur est hors d'usage.

La jonction pn

Lorsqu'on met en contact un cristal de germanium semiconducteur de type p et un cristal de germanium de type n, un échange de charges se produit par diffusion à la surface de séparation (Gr): des trous passent du semiconducteur de type p au semiconducteur de type n et se

Par "*diffusion*", on entend en général un déplacement désordonné, lié à l'agitation thermique, d'atomes ou de molécules en direction d'une chute de température ou de densité. Les particules en diffusion ne sont reliées à aucun point fixe de la structure cristalline, ou bien elles peuvent s'en libérer à tout instant sous l'influence d'une forte agitation thermique. Dans ce cas, la diffusion est liée à un transport de matière.

Il existe également une diffusion d'électrons et de trous au sein d'un cristal semiconducteur. Les porteurs de charge dont il s'agit se déplacent vers des "centres de recombinaison". Ceux-ci se présentent, principalement en surface, sous forme de défauts du réseau cristallin tels que dislocation et gauchissement, ont la propriété de favoriser la recombinaison. Les trous se déplacent surtout en direction de points où les électrons sont rassemblés, et les électrons, par contre, se dirigent vers les zones où les électrons sont moins concentrés et où les trous prédominent. On peut se représenter facilement ce double mouvement en se référant au phénomène de l'attraction et de la répulsion électriques. La diffusion des électrons et des trous est d'une grande importance pour la formation d'une couche d'arrêt dans les composants à semiconducteurs.

Fig. 32 Une couche d'arrêt s'est formée à la jonction pn qui s'oppose dorénavant à la poursuite de la diffusion des électrons et des trous. Entre le semiconducteur p et le semiconducteur n, règne une tension dite "tension de diffusion".

recombinent avec des électrons libres. Inversement, des électrons venant du semiconducteur n passent dans le semiconducteur p et se recombinaient avec des trous. Comme nous le savons, toute recombinaison se solde par l'annulation de deux charges élémentaires égales de signe opposé. Sur les deux côtés de la surface de séparation, le cristal semiconducteur s'appauvrit en charges mobiles libres et une région de non-conduction s'établit: la *jonction pn*. Les paires de porteurs de charge ne peuvent plus alors se recombinaient mutuellement en grand nombre; en effet, à la jonction pn, comme le montre la figure 32, apparaît une charge d'espace négative provoquée par la migration des trous vers la droite et qui s'oppose, dorénavant, par répulsion électrique, à l'entrée d'électrons dans le semiconducteur de type p. Inversement, à la droite de la surface de séparation (Gr), apparaît une charge d'espace positive provoquée par la migration des électrons vers la gauche et qui s'oppose, également par répulsion électrique, à l'entrée de nouveaux trous dans le semiconducteur n. C'est pourquoi l'échange mutuel de porteurs de charge est rapidement arrêté. Une *couche d'arrêt* s'est formée à travers laquelle les porteurs de charge ne peuvent plus dorénavant diffuser. La jonction pn est limitée à une zone de quelques millièmes de millimètres seulement. Sans la formation de la surface d'arrêt, la diffusion des porteurs de charge se serait finalement étendue à l'ensemble des semiconducteurs p et n; il n'existerait plus alors ni conduction par trous ni conduction par électrons.

Si nous avons insisté sur la formation de la couche d'arrêt, c'est pour la simple raison qu'elle recèle tout le secret de l'électronique des semiconducteurs. Si vous avez compris cette notion, vous pourrez sans grande difficulté suivre les développements ultérieurs sur la fabrication, le fonctionnement et les diverses utilisations des composants à semiconducteurs.

- Sous l'influence de la diffusion des porteurs de charge, une couche d'arrêt se forme à la jonction pn qui s'oppose à la poursuite de la diffusion des porteurs de charge.
- L'épaisseur de la couche d'arrêt est de quelques μ , 20 au maximum.

Fig. 33 Conduction extrinsèque et conduction intrinsèque en fonction de la température.
 a Conduction intrinsèque
 b Conduction extrinsèque pour un léger dopage
 c Conduction extrinsèque pour un fort dopage

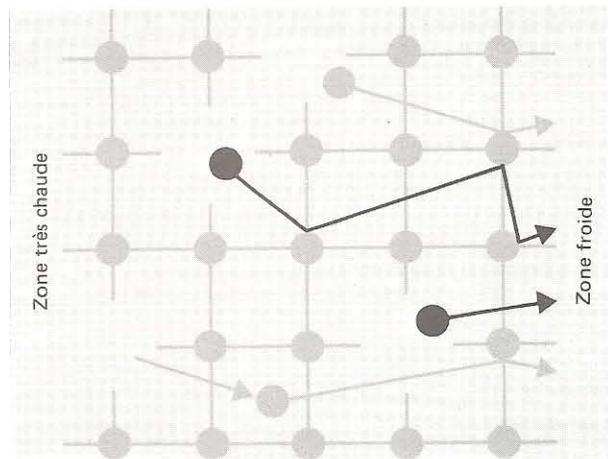
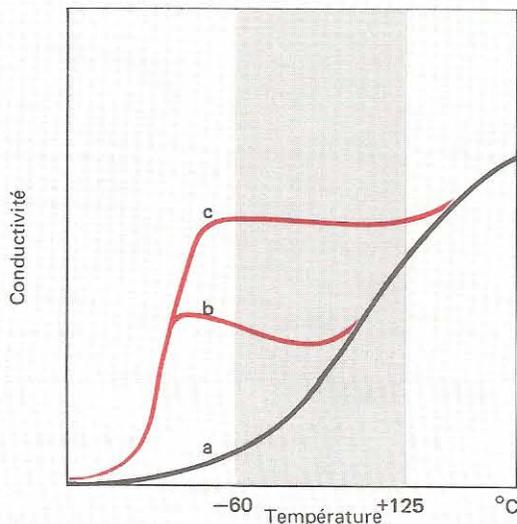
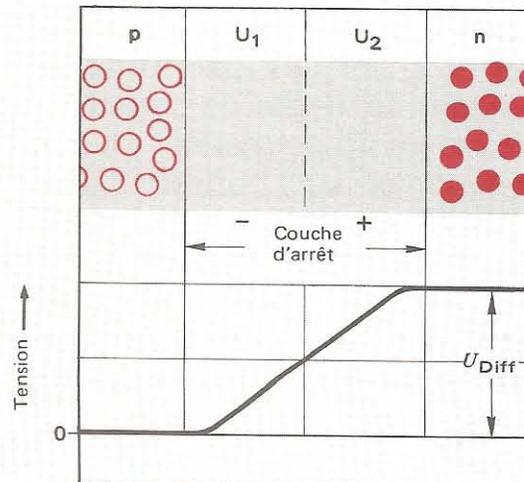


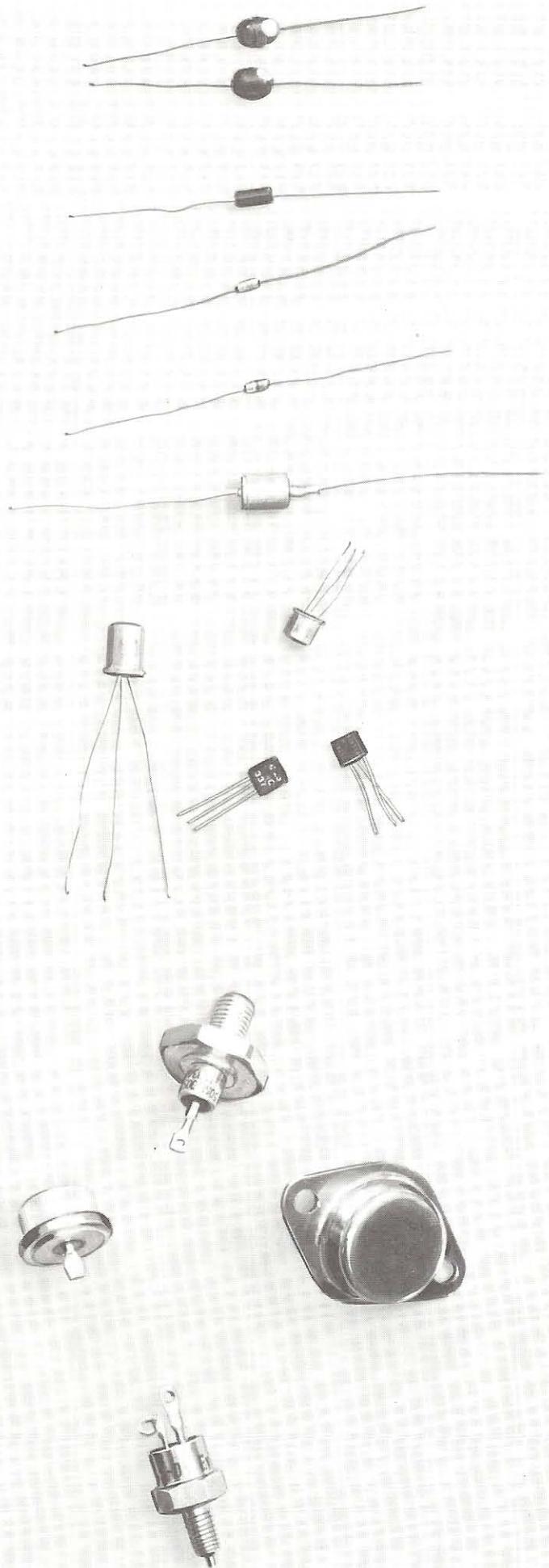
Fig. 34 Diffusion d'atomes provoquée par le surchauffement du semiconducteur. Le réseau cristallin se rompt et est finalement détruit.

Fig. 35 L'existence de la charge d'espace et son action antagoniste vis à vis de l'échange de charges à la jonction pn vous sembleront très faciles à comprendre si vous vous reportez à la structure atomique du cristal semiconducteur. Les semiconducteurs p et n en eux-mêmes, vus de l'extérieur, sont électriquement neutres, leurs charges libres venant exactement neutraliser les charges opposées des ions qui y sont reliés. Lorsqu'on relie un semiconducteur p à un semiconducteur n, les trous se déplacent à la surface de séparation (Gr) vers le semiconducteur n et laissent derrière eux les ions accepteurs négatifs. Inversement, les électrons se déplacent vers le semiconducteur p et laissent derrière eux les ions donneurs positifs. Mais comme les ions sont localement fixés dans le cristal semiconducteur, il en découle que la charge d'espace, en tant que somme des charges ioniques, est également fixée localement et ne peut par conséquent s'éloigner de la jonction pn. La zone de jonction U_1 est donc occupée par une charge d'espace négative et la zone de jonction U_2 par une charge d'espace positive, de sorte qu'une tension est créée entre la zone p et la zone n, dite *tension de diffusion*. Cette tension est de 0,2 à 0,3 volt pour la jonction pn germanium et de 0,6 à 0,7 volt pour la jonction pn silicium. Les semiconducteurs faiblement dopés ont une tension de diffusion un peu plus faible, les semiconducteurs fortement dopés une tension de diffusion légèrement plus forte.



Composants à semi-conducteurs

Au cours des dix dernières années, les composants à semi-conducteurs se sont progressivement imposés en électronique et ont, dans une très large mesure, supplanté définitivement les moyens de commutation et de commande utilisés jusque là, les tubes électroniques en particulier. Leurs avantages: dimensions réduites, faible tension de service, fiabilité accrue et entretien facile; d'autre part on peut les fabriquer actuellement de manière rationnelle. En électricité automobile il a fallu résoudre des problèmes d'un genre particulier posés par le moteur et par les conditions de la circulation, par exemple température de service élevée et soumise à de brusques variations, contraintes imposées par les chocs mécaniques, etc. Bosch a depuis longtemps pressenti qu'en automobile les procédés de commande électromécaniques, par exemple, atteignent un degré de perfectionnement ne permettant plus d'augmenter leurs performances et que la voie de l'électronique automobile est par conséquent ouverte. Aujourd'hui, en électricité automobile, de nombreux organes classiques ont déjà été remplacés par des composants à semi-conducteurs. Cette nouvelle technique de développement est loin d'être épuisée.



La diode

Structure de principe

La *diode à semiconducteurs* est un composant à usages multiples qui est très largement utilisée en électronique. Elle est constituée par deux régions de semiconducteurs, un semiconducteur de type p et un semiconducteur de type n. Une couche d'arrêt se forme à la jonction pn par suite de la diffusion des porteurs de charge. Les deux régions comportent chacune une connexion électrique (A_p , A_n). Aussi longtemps qu'aucune tension extérieure n'est appliquée à ces connexions, la tension de diffusion (U_{Diff}) règne à la jonction pn, celle-ci étant de 0,3 volt environ pour les diodes au germanium et de 0,7 volt environ pour les diodes au silicium. Si l'on relie la région p au pôle négatif d'une source de courant et la région n au pôle positif, le processus de diffusion, bloqué en l'absence de courant, est déclenché. La source est alors reliée à la diode de manière telle que la tension de diffusion est renforcée par la tension extérieure. La charge d'espace négative se trouve côté négatif de la source de courant et la charge d'espace positive côté positif. Il s'ensuit que tout se passe comme si les électrons étaient attirés d'un "cran" supplémentaire vers le pôle positif et les trous également vers le pôle négatif; la couche d'arrêt isolante s'élargit. La diode présente une forte résistance ohmique et bloque le courant. Elle est polarisée dans le *sens de blocage* ou *sens inverse*. Une tension inverse (U_{Sp}) règne à la jonction pn.

Si, au contraire, on relie la région p au pôle positif et la région n au pôle négatif, la source extérieure agit alors en opposition à la tension de diffusion; la couche d'arrêt est annihilée et avec elle cesse l'effet de blocage du courant. Les porteurs de charge submergent la jonction pn: les trous franchissent la surface de séparation (Gr) en direction du semiconducteur n, les électrons se rendent dans le semiconducteur p. Au voisinage immédiat de la jonction pn, les porteurs de charge se recombinent. Pour chaque recombinaison individuelle trou-électron, un "nouveau" trou passe de la connexion A_p dans le semiconducteur p et, simultanément, à la connexion A_n un "nouvel" électron pénètre dans le semiconducteur n. De cette manière, l'annulation des charges à la jonction pn est compensée en permanence par l'entrée de charges correspondantes aux connexions. La diode, qui est devenue conductrice, laisse passer le courant: elle est polarisée dans le *sens direct* (sens de passage). Une tension de passage (U_F) règne maintenant à la jonction pn, dont la valeur est égale à la chute de tension provoquée par la très faible résistance de passage de la diode.

- La jonction pn se comporte comme une résistance dont la valeur est très faible ou très élevée suivant la polarité de la source de courant.

- La jonction pn présente les propriétés d'une soupape. Elle laisse passer le courant électrique dans un sens déterminé et le bloque dans le sens inverse.

- Règle:
Sens direct, relier p au positif
et n au négatif.

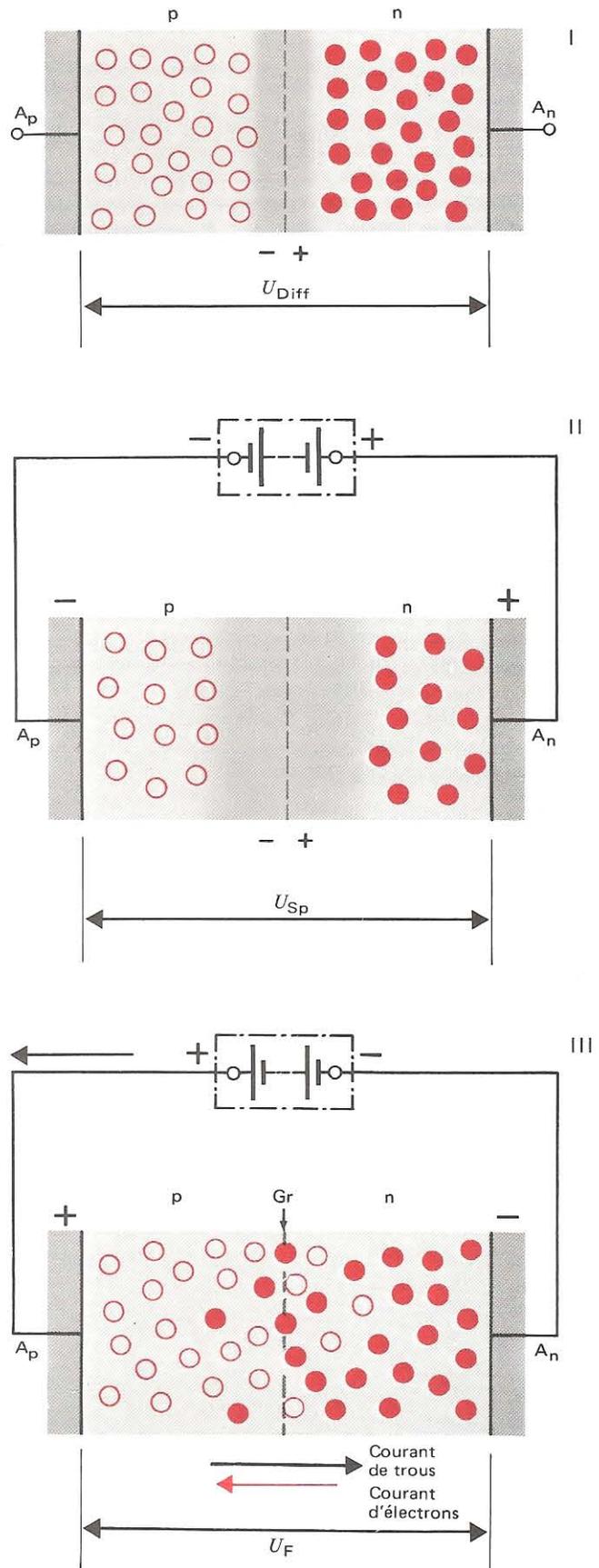


Fig. 37 Schéma et fonctionnement de la diode à semiconducteurs:
I Formation de la couche d'arrêt, en l'absence d'une tension provenant d'une source extérieure.
II Source de courant reliée dans le sens inverse. La couche d'arrêt s'élargit.
III Source de courant reliée dans le sens direct. La couche d'arrêt disparaît.

Courbe caractéristique de la diode

Dans la figure représentant le courant et la tension, la résistance ohmique d'un circuit, en tant que rapport U/I , peut être figurée par une droite. La droite est d'autant plus inclinée que la résistance est plus faible. Lorsque la droite est verticale, la résistance est nulle — ce qui peut être réalisé, approximativement, par le court-circuitage du circuit. Si la droite est horizontale, c'est que la résistance est infinie (∞), ce qui correspond en gros à l'interruption du circuit lorsqu'on ouvre un interrupteur. Une diode idéale présenterait donc, dans le sens inverse, une résistance infinie et, dans le sens direct, une résistance nulle, fonctionnement qu'on peut représenter par un diagramme à angle droit (Fig. 39). Mais aucune diode ne possède cet effet de soupape idéal; les diodes utilisées dans la pratique en diffèrent plus ou moins. Les meilleures sont celles dont la caractéristique de résistance se rapproche le plus du diagramme à coude brusque. Nous allons maintenant étudier les propriétés des diodes à semiconducteurs réellement utilisées dans la pratique.

Lorsque la diode est polarisée dans le sens direct, il suffit d'une très petite tension pour rendre conductrice la jonction pn. La tension pour laquelle le courant commence à s'écouler est la *tension de seuil* (U_{Sw}); elle est égale en valeur absolue à la tension de diffusion (U_{Diff}), mais de sens inverse. On peut donc écrire: $U_{Sw} = -U_{Diff}$. Une nouvelle augmentation de la tension provoque le passage d'un courant intense qu'il faut limiter au moyen d'une résistance pour assurer la protection de la diode.

Lorsque la diode est polarisée dans le sens inverse, la tension inverse totale, relativement importante, règne à la jonction pn; celle-ci possède une résistance de couche d'arrêt très forte mais en aucun cas infinie car des porteurs de charge relevant de la conduction intrinsèque du cristal semiconducteur agissent dans la couche d'arrêt. A la température de service normale, la couche d'arrêt des diodes usuelles possède une certaine conductivité et un certain courant, appelé *courant inverse*, circule aussi dans le sens bloqué. En général, le courant inverse ne croît que très faiblement avec la tension inverse. Lorsque la température de service s'élève, l'effet de blocage perd de son efficacité, ce à quoi il fallait s'attendre du fait de la conduction intrinsèque.

Phénomène du claquage

Il est facile de concevoir qu'une diode ne peut conserver sa propriété de blocage lorsque la tension inverse croît indéfiniment. De même, un ballon de caoutchouc ne peut être gonflé au-delà d'une certaine limite. Si l'on élève la tension inverse (U_{Sp}) au-dessus d'une certaine valeur, la couche d'arrêt subit un claquage électrique et un courant intense s'établit dans le sens inverse, le *courant de claquage*. La diode a perdu sa propriété de soupape. La tension pour laquelle le claquage se produit dépend de la nature du semiconducteur et du degré de dopage. Elle est d'autant plus faible que le taux de dopage du semiconducteur est élevé. Chaque sorte de diode a, en quelque sorte, sa propre tension de claquage.

Fig. 38 La résistance des métaux ne dépend pas du sens du courant. La résistance du conducteur métallique est d'autant plus faible que la pente de la droite est plus forte.

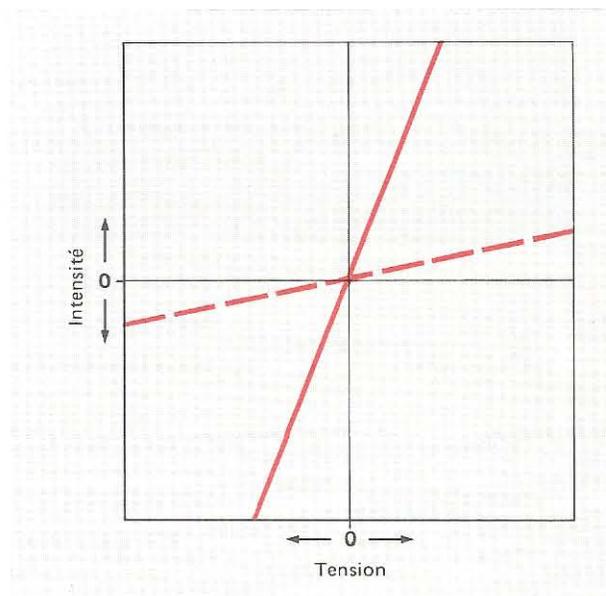
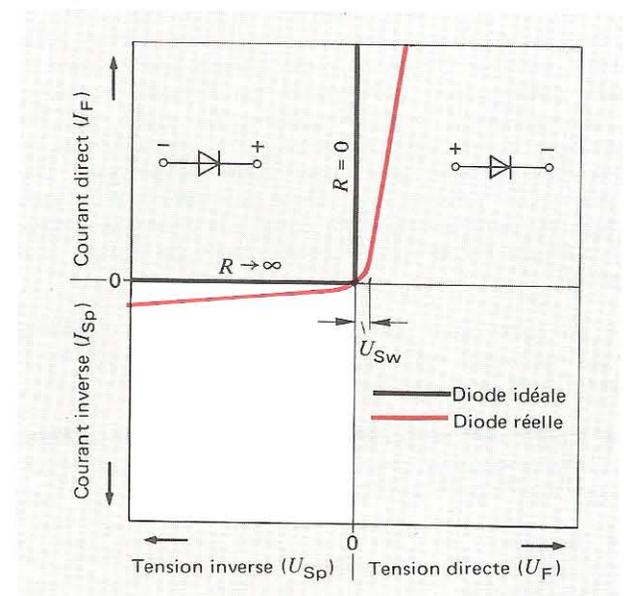


Fig. 39 La résistance des diodes dépend très fortement du sens du courant ou du sens de la tension appliquée.



Le claquage est provoqué par l'intensité du champ électrique régnant dans la couche d'arrêt; cette intensité est donnée par la formule $E = U_{Sp}/d$, dans laquelle d représente l'épaisseur de la couche d'arrêt. Lorsqu'on élève la tension inverse, l'intensité du champ s'élève également. A partir de 100 kV/cm environ, on peut s'attendre à un claquage électrique à la jonction pn. On connaît actuellement deux explications relatives à ce phénomène technique très important: effet Zener, effet d'avalanche.

Claquage par effet Zener

au-dessous d'une tension inverse de 5,7 volts. L'intensité du champ ayant atteint au minimum la valeur de 100 kV/cm peut rompre les liaisons de covalence dans le réseau cristallin. Il apparaît brusquement de très nombreuses paires électron-trou qui, sous l'influence de la tension de claquage, donnent naissance à un courant de sens inverse intense. Les températures élevées favorisent cet effet; autrement dit, lorsque la température s'élève, la tension de claquage Zener (U_Z) diminue.

Effet d'avalanche

au-dessus d'une tension inverse de 5,7 volts. L'intensité du champ est maintenant si forte que des paires électron-trou de la conduction intrinsèque sont soumises à une forte accélération dans la couche d'arrêt et se heurtent à des électrons de valence du réseau cristallin, une partie d'entre eux étant alors chassés à l'extérieur. Ces trous et électrons nouvellement créés sont à leur tour accélérés par le champ électrique intense et provoquent l'éjection de nouveaux électrons de valence — et ainsi de suite. Comme le montre la figure 42, il se

produit une "avalanche" de porteurs de charge — à la manière d'une réaction en chaîne — donnant naissance à un courant extrêmement intense. Contrairement à l'effet Zener, l'effet d'avalanche s'affaiblit lorsque la température s'élève, du fait que les vibrations du réseau cristallin, en devenant plus fortes, s'opposent de plus en plus à la collision des porteurs de charge. La tension pour laquelle le claquage que nous venons de décrire se déclenche est appelée *tension d'avalanche* (U_{Av}). L'effet d'avalanche est très prononcé dans les diodes au silicium.

- Lorsque la diode est polarisée dans le sens direct, un courant intense circule à partir d'une tension très faible dite tension de seuil.
- Lorsque la diode est polarisée dans le sens inverse, un très faible courant inverse circule, dû à la conduction intrinsèque du cristal semiconducteur.
- Lorsque la température s'élève, l'effet de blocage de la diode s'atténue.
- Lorsqu'on fait croître la tension inverse (U_{Sp}), un claquage électrique se produit. L'effet de blocage de la diode est totalement annulé et un très intense courant de claquage circule.

$U_{Sp} < 5,7$ volts = claquage par effet Zener

$U_{Sp} > 5,7$ volts = claquage par effet d'avalanche

Fig. 40 Courant inverse en fonction de la tension inverse et de la température.

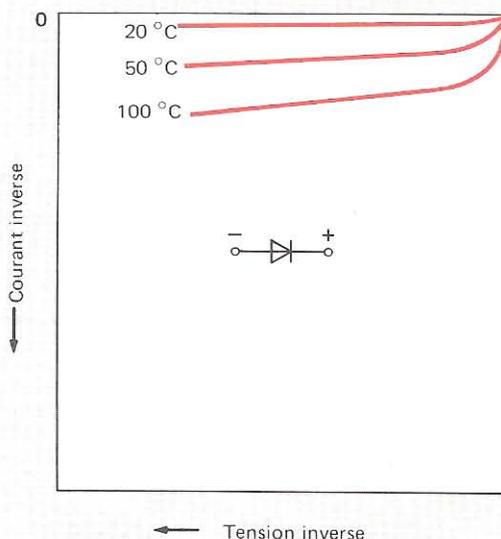
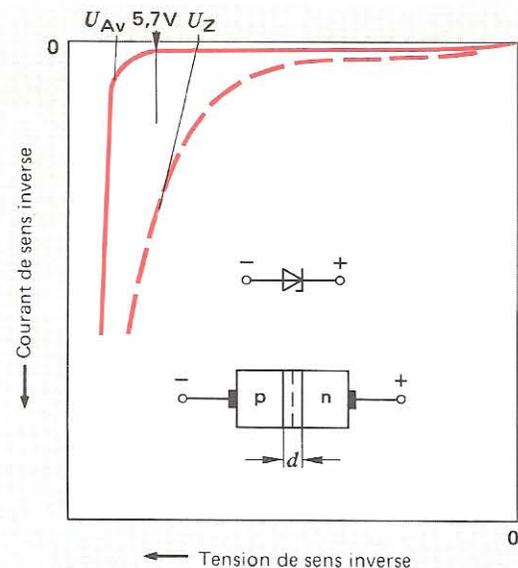


Fig. 41 Lorsqu'on fait croître la tension inverse jusqu'à l'apparition du claquage électrique, le courant inverse s'élève brusquement. Il s'agit ici soit du claquage par effet Zener (U_Z), soit du claquage par effet d'avalanche (U_{Av}).



Allure des courbes caractéristiques

Le diagramme courant-tension comprend donc trois régions: la région de circulation du courant, la région de blocage et la région de claquage. Celles-ci caractérisent clairement le fonctionnement de la diode à semiconducteurs. Une représentation graphique de ce genre constitue la *courbe caractéristique* du composant considéré. Chaque composant, y compris la diode, a sa propre courbe caractéristique. A première vue, les courbes caractéristiques se ressemblent toutes, mais un examen plus attentif permet toutefois de constater qu'elles diffèrent souvent très sensiblement les unes des autres. Ainsi, par exemple, la courbe caractéristique d'une diode au silicium a une allure quelque peu différente de la courbe caractéristique d'une diode au germanium: coude de la courbe plus prononcé et pente plus accentuée. Pour la diode au silicium, la tension de seuil (U_{Sw}) est d'environ 0,7 volt et seulement de 0,3 volt pour la diode au germanium. Par comparaison avec la diode au germanium, la diode au silicium a un courant inverse très faible, ce que nous pouvons facilement

déduire des courbes de résistance du germanium et du silicium purs représentées à la figure 25. Il s'ensuit que les diodes au silicium peuvent être utilisées à des températures de service notablement plus élevées.

Variode^{®1)}

Une variode est une diode spéciale qui ne peut être utilisée que dans le sens direct. Créée par Bosch, la *variode* sert à la limitation du courant dans le montage de régulation pour génératrices de véhicules. Sa courbe caractéristique est remarquable par la montée très rapide du courant immédiatement après l'apparition d'une faible tension de seuil. Elle est construite à partir de germanium, avec faible dopage d'indium.

¹⁾ ® = Marque déposée Robert Bosch GmbH

42

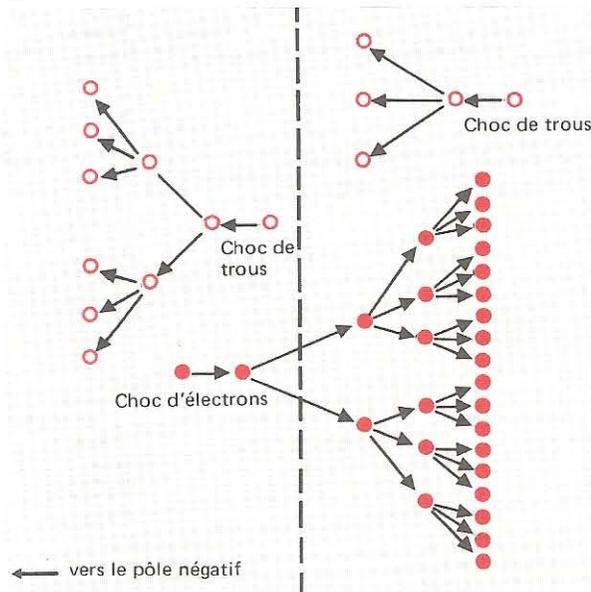


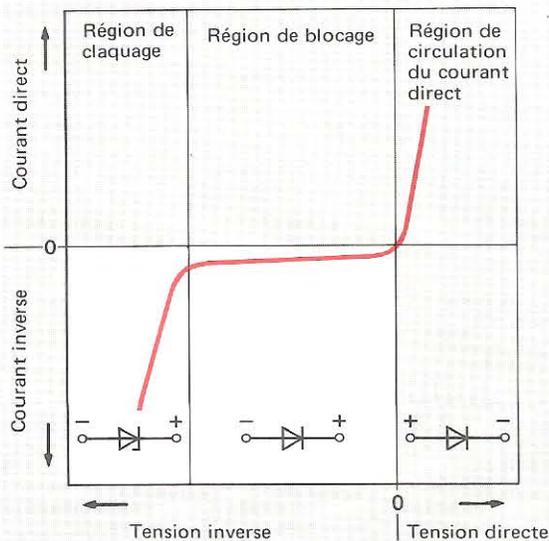
Fig. 42 Effet d'avalanche dans la couche d'arrêt. Représentation schématisée simplifiée:

Un choc d'électrons déclenche une avalanche d'électrons. Un choc de trous déclenche une avalanche de trous. Remarquez le sens du choc des porteurs de charge!

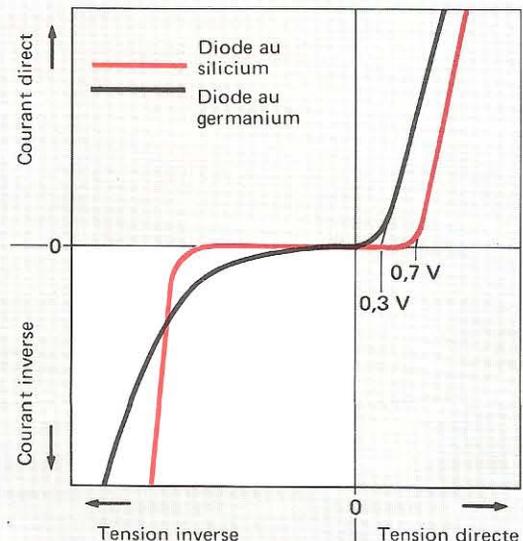
Fig. 43 Courbe caractéristique complète d'une diode à semi-conducteurs usuelle.

Fig. 44 La courbe caractéristique d'une diode au silicium (Si) se distingue nettement de celle d'une diode au germanium (Ge).

43



44



La variode est en outre le premier composant à semi-conducteur fabriqué en série pour être utilisé dans l'équipement des véhicules automobiles. Pour plus de détails, consulter la notice technique traitant de l'électronique dans l'automobile.

En règle générale, les diodes ne doivent pas être utilisées dans la région de claquage, car elles risquent alors d'être détruites par la chaleur de dissipation du courant. C'est pourquoi il faut veiller à ce que, en service, la tension inverse maximum soit toujours inférieure à la tension de claquage.

La diode de Zener

Les diodes de Zener, ainsi appelées d'après le nom de l'inventeur, fonctionnent exclusivement dans les régions de blocage et de claquage. Leur rôle est de limiter la tension, par exemple pour la protection d'appareils de mesure sensibles ou d'éléments constitutifs de montages électroniques. Dans ce cas, on préfère

les diodes à pente très accentuée, et donc spécialement les diodes au silicium. La figure 47 montre l'exemple d'une caractéristique de diode de Zener avec tension $U_{AV} = 10$ volts. L'intensité du courant de claquage ne doit pas pénétrer dans la région située au-dessous de la courbe de puissance dissipée maximum (P_{Vmax}) afin de ne pas surchauffer le composant. Dans l'exemple représenté, le courant correspondant à une tension de 11 volts ne doit pas excéder 90 milliampères. La puissance maximum dissipée est donc alors:

$P_{Vmax} = 11 \text{ V} \times 0,09 \text{ A} = 1 \text{ W}$. La figure 45 représente un montage simple conçu pour la protection d'un instrument de mesure. La diode de Zener (ZD) est polarisée en sens inverse. On utilise ici une diode dont la tension de claquage correspond à la tension maximum que peut supporter l'instrument de mesure, par exemple $U_{AV} = 10$ volts. Aussitôt que la tension U appliquée à l'instrument de mesure et à la diode dépasse 10 volts, la diode devient conductrice et le courant de claquage provoque une chute de tension en passant par la résistance (R). Il s'ensuit que la tension de l'instrument demeure dans les limites admissibles pendant la durée de la surcharge.

45

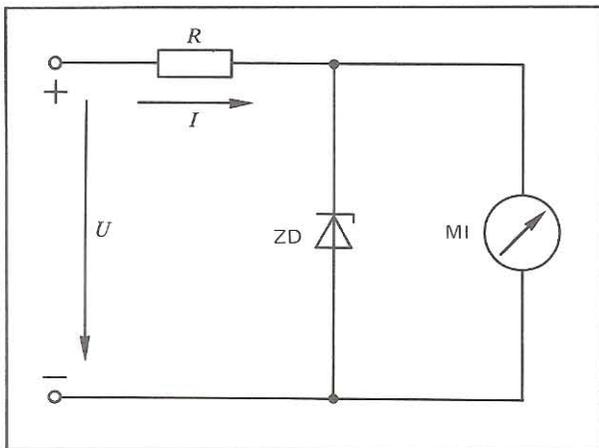


Fig. 45 Instrument de mesure (MI) protégé contre les surtensions par une diode de Zener (ZD). Remarquez la polarisation de la diode!

Fig. 46 Courbe caractéristique de la variode comparée à la courbe caractéristique d'une diode ordinaire.

46

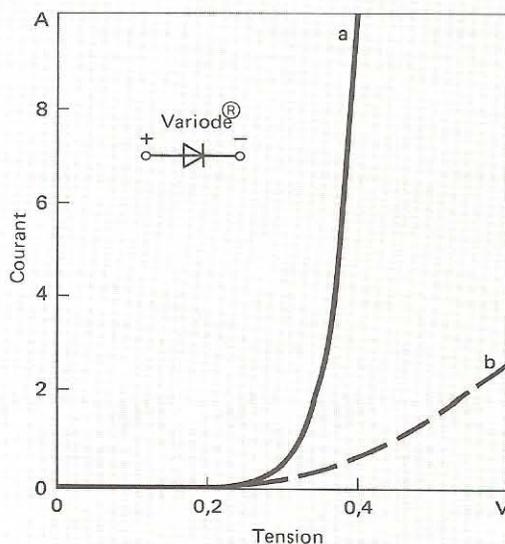
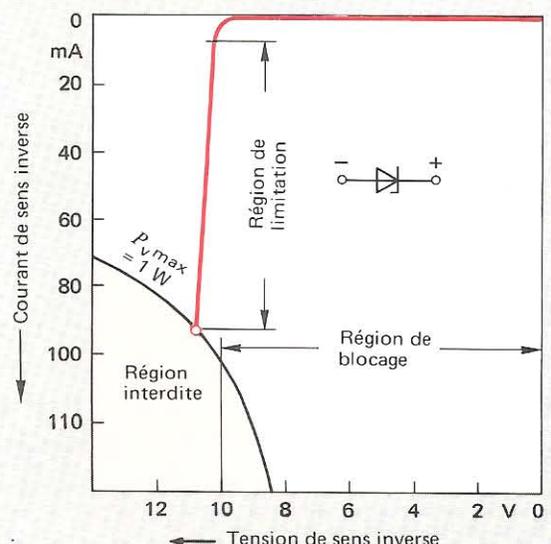


Fig. 47 Exemple de caractéristique d'une diode avec limitation du courant à 90 mA.

47



Utilisation de la diode à semiconducteurs

Les composants à semiconducteurs se distinguent des composants conventionnels non seulement par les faibles tensions de fonctionnement qu'ils requièrent mais encore par leur dimensions très réduites. Les connexions, supports, surfaces de refroidissement et boîtiers exigent souvent beaucoup plus de matière et de place que les composants proprement dits. Les formes de l'élément sont déterminées d'abord par les données physiques, puis par la recherche d'un fonctionnement optimal et d'une fiabilité élevée. D'autre part, la forme de l'élément est étroitement liée à la méthode de fabrication orientée vers la production de masse et dont les impératifs primordiaux sont la qualité et la rentabilité. Les composants de grande puissance, par exemple les diodes redresseuses utilisées en électronique de puissance, exigent un refroidissement suffisant en service continu.

En technologie des semiconducteurs, les coûts de fabrication du matériau à partir duquel sont créés les semiconducteurs p et n revêtent une importance primordiale. Une stricte économie et une rationalisation poussée s'imposent donc. La physique des semiconducteurs soutient constamment l'effort des techniciens, comme c'est le cas au premier chef pour l'obtention d'une mince

couche d'arrêt totalement irréprochable; mais en ce qui concerne la production en quantité importante des matériaux semiconducteurs, les problèmes demeurent imparfaitement résolus. C'est pourquoi on est contraint de fabriquer des régions de type p et de type n aussi minces que possible, ce qui oblige à donner une forme plate à la plupart des diodes à semiconducteurs. Plus la surface de l'élément est importante et plus élevée pourra être le courant admissible, de même que la capacité déterminée par la couche d'arrêt, appelée *capacité de transition* (C_{SP}). Présentant une résistance ohmique élevée, la couche d'arrêt se comporte comme un isolant et les deux régions de semiconducteurs sont les armatures conductrices du condensateur ainsi formé. D'après l'égalité

admittance = fréquence du circuit x capacité de transition

cette dernière représente une capacité de court-circuit pour la diode. Lorsque la fréquence augmente, la diode est de plus en plus court-circuitée par sa propre capacité et elle perd son efficacité. Pour les fréquences élevées, on utilise des diodes de petite capacité, c'est-à-dire à couche d'arrêt de surface réduite. Dans la gamme des plus hautes fréquences, on se sert de diodes dont les deux régions de semiconducteurs ne sont plus en liaison que par un contact ponctuel ou par une pointe (diode à contact ponctuel, diode à pointe). Naturellement, en raison de la forte résistance pointe/surface, l'intensité des courants de sens direct est dans ce cas très réduite.

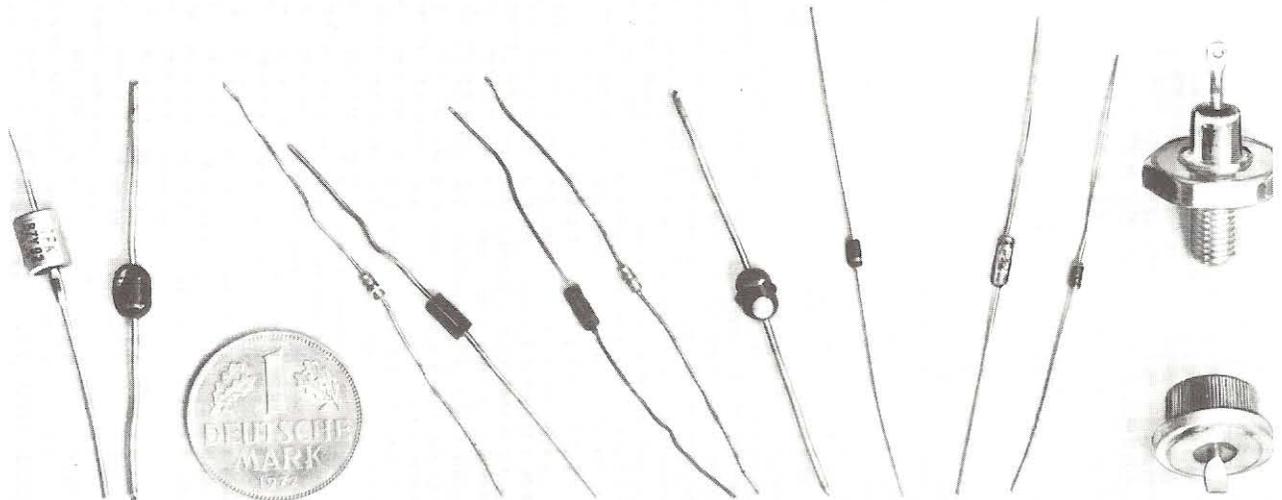


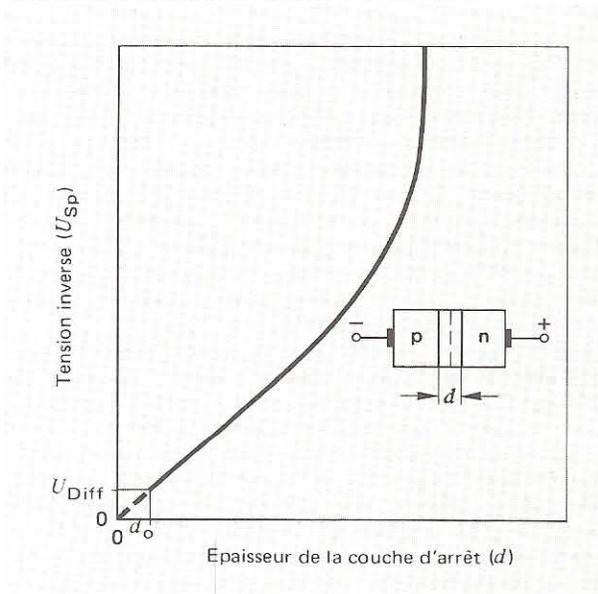
Fig. 48 Si petites que soient les diodes à semiconducteurs en comparaison des anciens tubes diodes, tubes à effluves et redresseurs secs autrefois très utilisés, elles se différencient encore fortement les unes des autres par la taille, suivant le domaine d'utilisation et la puissance.

Diodes à capacité variable

Les diodes à capacité variable sont des diodes plates dont la couche d'arrêt possède une capacité relativement forte. La capacité de transition, ordinairement considérée comme indésirable, est utilisée techniquement dans cette sorte de diode. En l'absence de tension extérieure appliquée à la diode, la tension de diffusion (U_{Diff}) se manifeste seule à la jonction pn sans courant, et il existe donc une capacité qui est fonction de l'épaisseur de la couche d'arrêt (d_0) correspondant à la tension de diffusion. Si l'on applique une tension extérieure dans le sens de blocage, l'épaisseur de la couche d'arrêt (d) croît jusqu'à une valeur déterminée. Par analogie avec les condensateurs dont la capacité diminue lorsqu'on augmente l'épaisseur de leur diélectrique, il est facile de comprendre que la capacité de transition diminue lorsque la tension inverse augmente. Il va de soi que les diodes à capacité variable sont toujours, en service, polarisées en sens inverse.

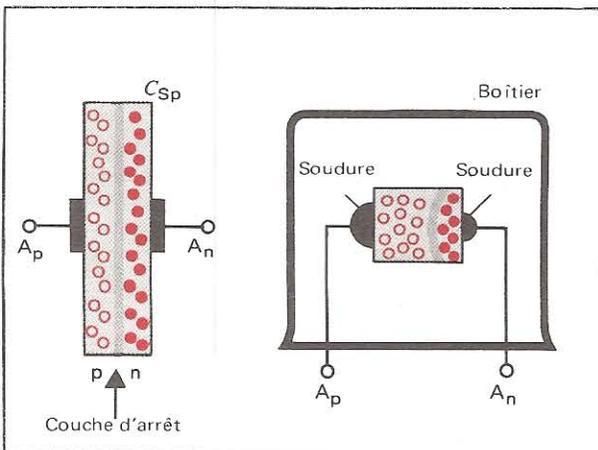
Fig. 49 Lorsque la tension inverse s'élève, l'épaisseur de la couche d'arrêt augmente, mais dans certaines limites seulement.

Fig. 50 Les diodes plates ont une grande capacité de transition. Représentation simplifiée et exemple de réalisation.



49

50



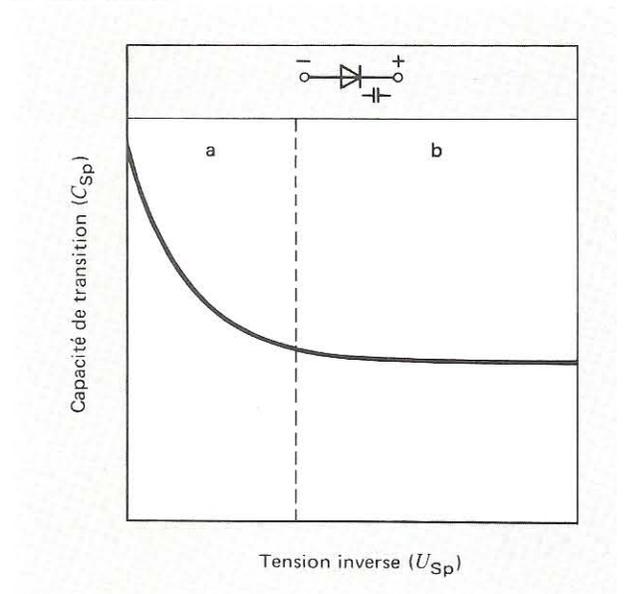
Dans les montages électroniques, les diodes à capacité variable, appelées également *varactors*, sont utilisées pour la multiplication et la démultiplication des fréquences, de même que pour la recherche automatique des émetteurs et le réglage automatique de syntonisation dans les récepteurs à ondes ultra-courtes et les téléviseurs.

Diodes redresseuses

Le redressement du courant alternatif dans les installations d'alimentation et dans les appareils fonctionnant sur secteur constitue encore actuellement un important domaine d'utilisation des diodes. Comme les courants à

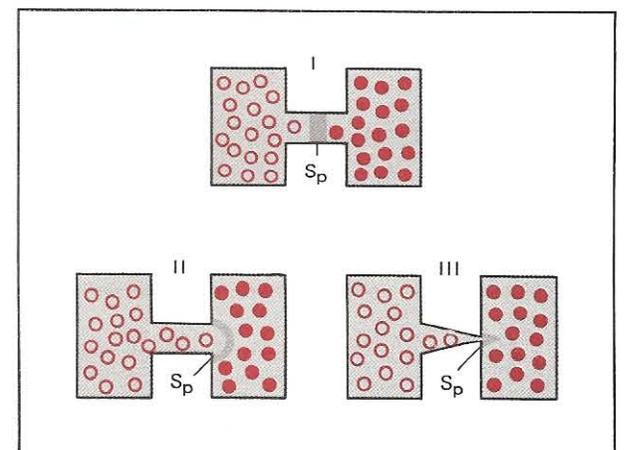
Fig. 51 Capacité de transition en fonction de la tension inverse. Gamme de tension a: C_{Sp} dépend étroitement de U_{Sp} (Varactor) Gamme de tension b: C_{Sp} ne dépend pratiquement plus de U_{Sp}

Fig. 52 Structure schématique de diodes à faible capacité de transition (S_p = couche d'arrêt)
I Diode à jonction pn réduite II Diode à contact ponctuel
III Diode à pointe

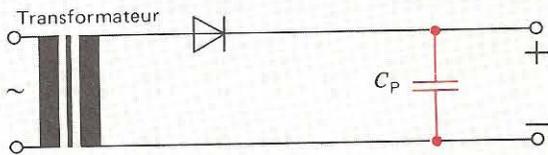


51

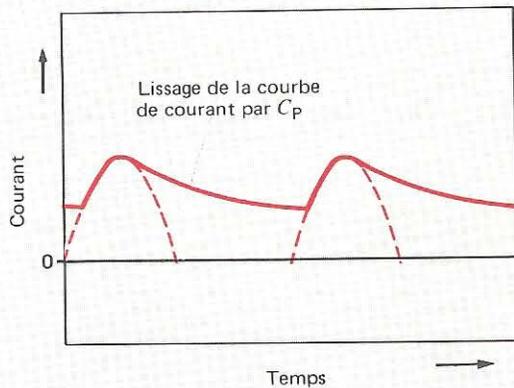
52



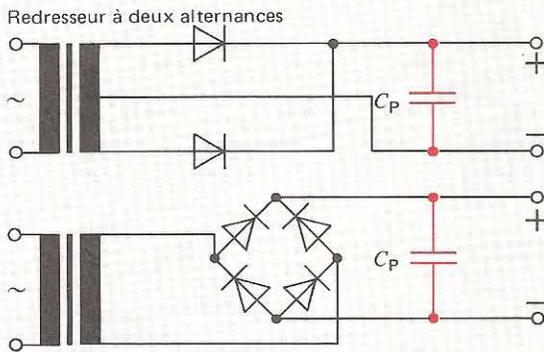
Redresseur à une alternance



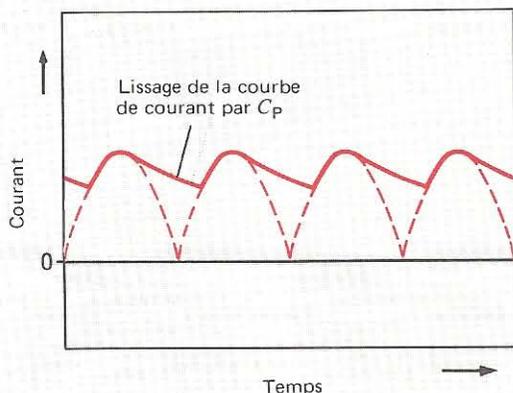
II



III



IV



redresser sont, en règle générale, des courants à basse fréquence (par exemple 16 2/3, 50, 60 et 300 Hz), la capacité de transition ne provoque aucune gêne. C'est pourquoi on peut construire et utiliser des diodes à grande surface, autorisant le passage d'un courant direct intense et donc la transmission de grandes puissances, raison pour laquelle ces diodes sont appelées également *diodes de puissance*. L'introduction de telles diodes de puissance dans le secteur de l'énergie électrique a été à l'origine d'une nouvelle branche de l'électronique, aujourd'hui encore en plein développement: l'électronique de puissance. Les redresseurs doivent normalement dissiper une chaleur importante (effet Joule) et leur construction est adaptée à cet impératif. Dans de nombreux cas, la valeur maximum des tensions alternatives usuelles est trop élevée pour que la couche d'arrêt d'une seule diode puisse la supporter en permanence. C'est pourquoi on est amené à connecter, suivant les besoins, plusieurs diodes en série. De cette manière, on obtient des redresseurs capables d'opposer la résistance souhaitée à la tension inverse. Des ailettes de refroidissement, des boîtiers spécialement étudiés ainsi que des dispositifs de fixation sur des surfaces de refroidissement assurent une dissipation satisfaisante de la chaleur. Les redresseurs de modèle ancien, au sélénium ou à oxyde de cuivre, par exemple, sont de plus en plus remplacés par le *redresseur au silicium* qui est beaucoup moins encombrant en même temps que beaucoup plus puissant. La structure du redresseur au silicium correspond à celle d'une diode plate. Un mince disque de silicium pur est recouvert d'un côté avec du phosphore comme donneur et de l'autre côté avec du bore comme accepteur. A haute température, les couches de recouvrement s'allient au silicium en constituant d'un côté une région n et de l'autre côté une région p pour ainsi dire d'une seule pièce. Pour assurer une bonne dissipation de la chaleur, la plaquette de silicium dopée sur les deux faces est fixée sur le fond du boîtier métallique, celui-ci étant fermé hermétiquement pour éviter l'entrée d'impuretés et l'encrassement qui en résulterait. Les redresseurs au silicium ne nécessitent que peu de place et ont un rendement de 99 %, ce qui correspond par conséquent à la très faible perte de 1 %. Ils peuvent servir au redressement de tensions allant jusqu'à 1 600 V.

En fonctionnant en redresseur, la diode s'échauffe aussi bien durant la phase directe que durant la phase de blocage. Comme dans le cas de tout autre semiconducteur, on ajuste la puissance débitée en fonction de la température maximum que la diode peut supporter en permanence sans que le fonctionnement en soit perturbé. En général, ils s'agit de la température de la partie la plus sensible de la diode, c'est-à-dire de la couche d'arrêt. La température maximum admissible des diodes au silicium du type que nous venons de décrire est de 140 °C. Dans le cas où le matériau de construction employé est plus sensible à la température, la limite de température admissible se situe naturellement à une valeur inférieure. Le redresseur peut être d'autant plus sollicité électriquement qu'il est mieux refroidi. Lorsque le courant direct est faible, il suffit de visser la diode au silicium directement sur le châssis du redresseur. Les redresseurs de puissance au silicium débitant 6 ampères et au-dessus sont pourvus d'un boîtier à ailettes de refroidissement. Un refroidissement supplémentaire par ventilation permet d'élever de deux à trois fois l'intensité nominale.

Fig. 53 Schémas de principe de redresseurs et courbes caractéristiques de l'intensité en fonction du temps, sans lissage et avec lissage par condensateur C_P , branché en parallèle.
I et II Redressement d'une seule alternance
III et IV Redressement des deux alternances

Le transistor

En 1948, quand les Américains Bardeen et Brattain inventèrent le transistor au cours de recherches sur les diodes à semiconducteurs et que leur compatriote Shockley put en expliquer les propriétés physiques, pour ainsi dire personne ne pressentit le triomphe de ce composant électronique universel, d'importance capitale, qui allait marquer le début d'une nouvelle époque. Cependant, peu d'années après sa création, de nombreuses possibilités d'utilisation s'étaient déjà fait jour. L'attribution du prix Nobel aux trois savants américains doit être considérée comme la consécration publique de cette révolution technologique.

Par la suite, l'intérêt suscité par les matériaux semi-conducteurs dans le monde des spécialistes ne cessa de croître. Le domaine des semiconducteurs a connu un développement d'une rapidité stupéfiante, puissamment soutenu par des études et des recherches incessantes. La miniaturisation des composants et des montages électroniques fut une des caractéristiques les plus marquantes de ce développement auquel le transistor a contribué pour une large part.

En 1959, on estimait encore à 30 millions de kilowatts-heures la consommation quotidienne mondiale nécessaire au seul chauffage électrique des tubes électroniques. Toute cette énergie est actuellement épargnée car

le transistor, qui a totalement supplanté les tubes électroniques, fonctionne sans chauffage. En outre, le transistor ne requiert au maximum que 10 % de la tension de service des anciens tubes. Ce dernier point ne doit pas être sous-estimé si l'on considère qu'il est d'autant plus difficile d'évacuer correctement la chaleur dissipée par effet Joule que l'on donne aux appareils électroniques une dimension plus réduite. Dans le secteur de l'"électronique de loisirs" (radio, télévision, etc.), on a réalisé tout récemment une performance qui aurait semblé impensable il y a seulement quelques années: la construction de téléviseurs couleurs *totale*ment électroniques, c'est-à-dire ne comportant aucun tube sauf le tube image bien sûr. Blaupunkt peut vous livrer aujourd'hui même des téléviseurs couleurs totalement électroniques, à écran de 67 cm, ne consommant que 240 watts contre 330 auparavant. Dans un tel appareil, environ 200 composants à semiconducteurs, dont de nombreux transistors, sont réunis sous un volume très réduit.

Le transistor est également en passe de conquérir une place prépondérante dans le domaine de la commutation. Comparé aux commutateurs mécaniques, le transistor présente en effet de nombreux avantages: il peut contrôler des courants beaucoup plus intenses, il fonctionne sans bruit et pratiquement sans inertie du fait de l'absence de pièces mécaniques en mouvement. De surcroît, il n'exige aucun entretien. C'est pourquoi le transistor a pu faire son apparition dans l'automobile et y susciter la création d'une nouvelle branche: *l'électronique automobile*.

Fig. 54 Redresseur au silicium. Représentation schématique de la structure du disque de silicium et réalisation pratique.

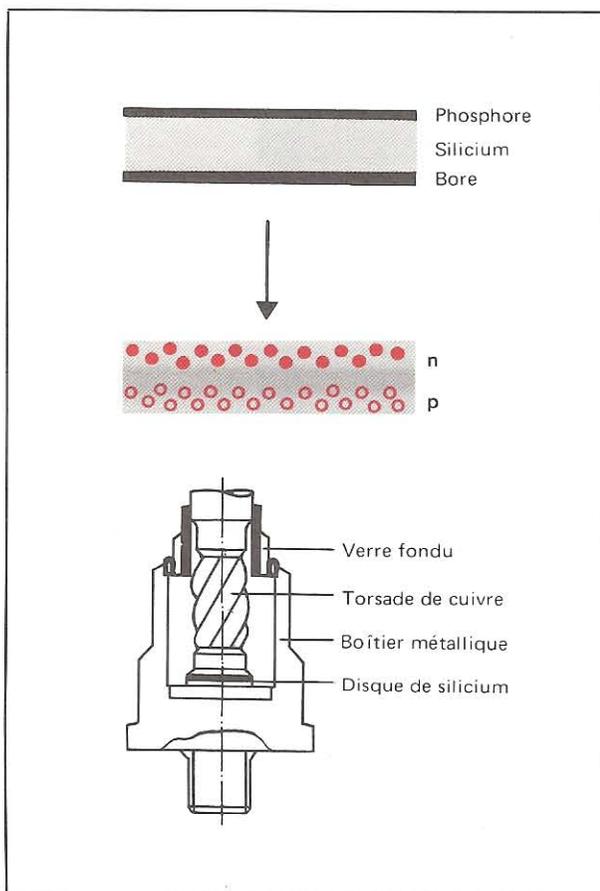
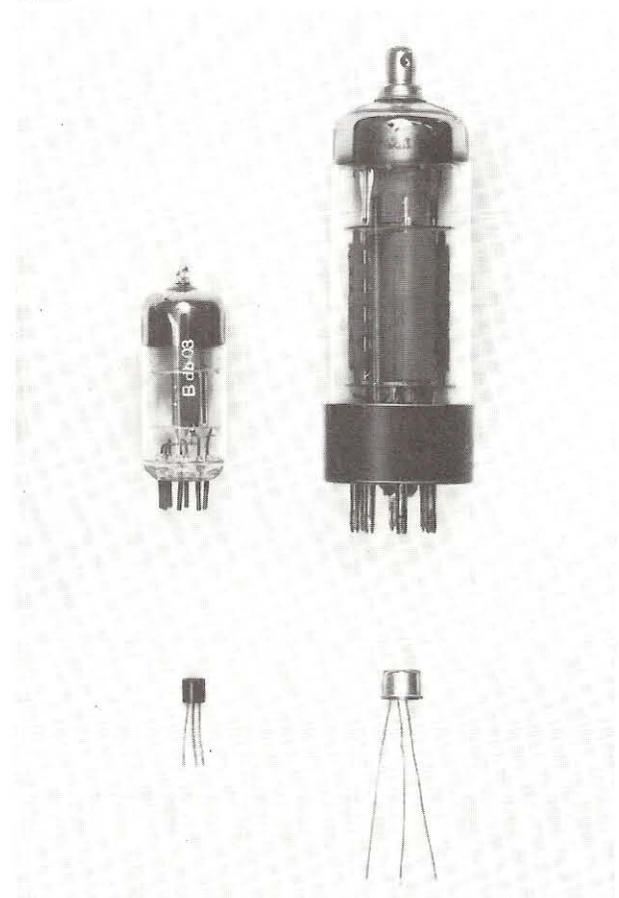


Fig. 55 Transistors et tubes électroniques. Tailles comparatives: à gauche, tube triode et transistor d'amplification haute fréquence. A droite, tube pentode et transistor d'amplification basse fréquence (amplification de puissance de l'étage final).



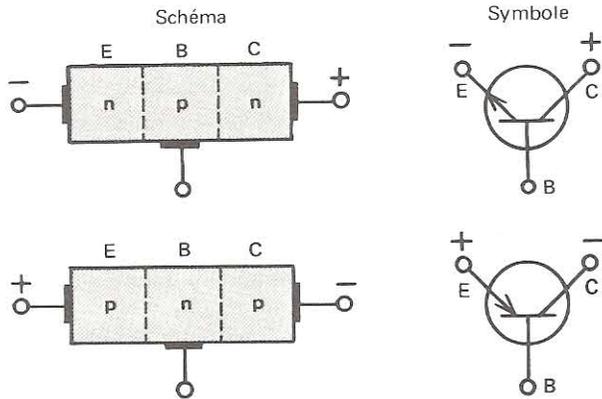
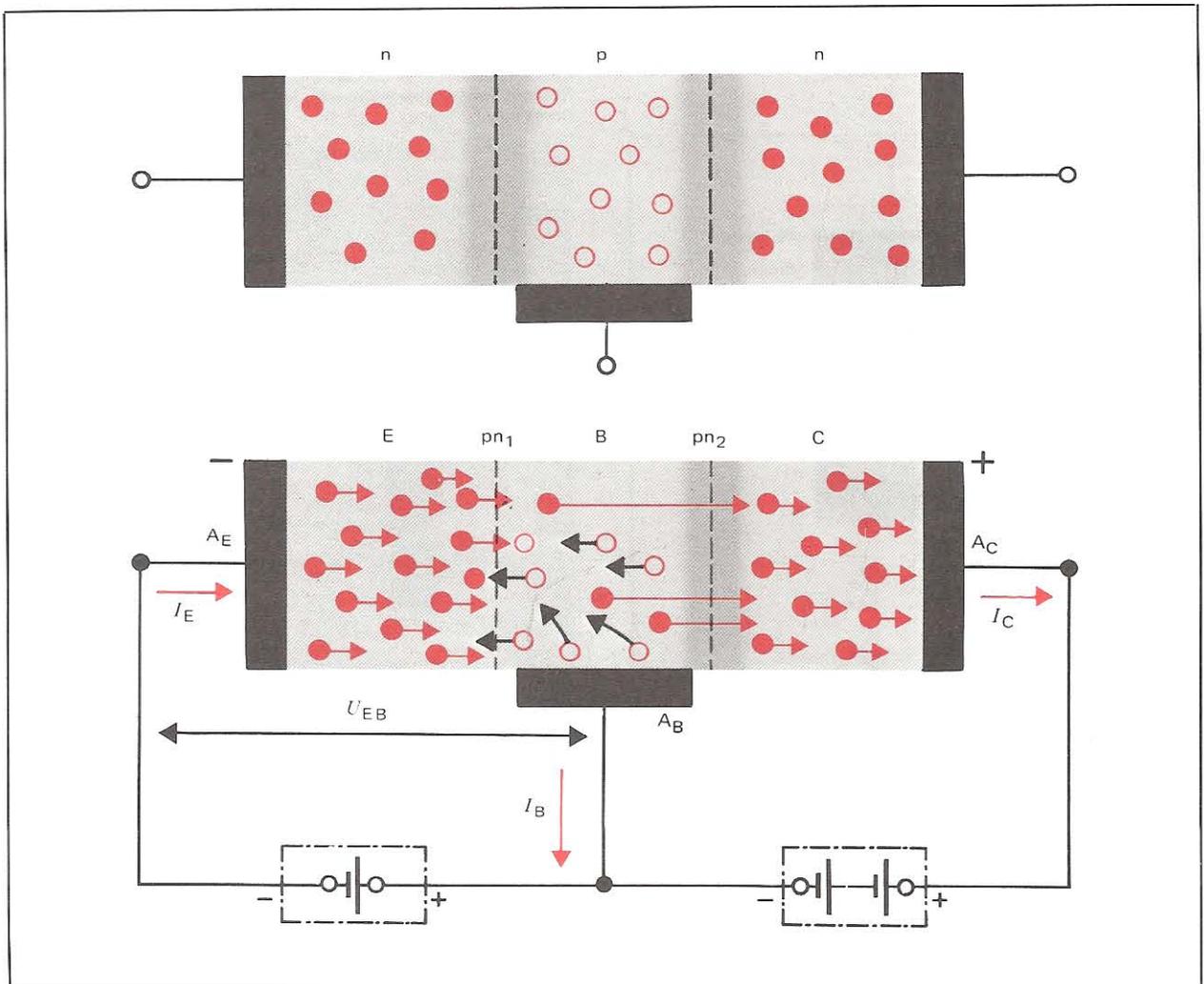


Fig. 56 Transistor npn et transistor pnp. Schéma et symbole.

Structure de principe

Le transistor est un composant à semiconducteurs comportant, associées en série, trois régions en semi-conducteur p ou semi-conducteur n. Suivant l'ordre des régions, on distingue le transistor npn et le transistor pnp. Chacune des trois régions de semiconducteurs possède une connexion. La région médiane est appelée *base* (B) et les deux régions extérieures sont l'*émetteur* (E) et le *collecteur* (C). Un transistor possède par conséquent deux jonctions pn qui ont d'importantes fonctions à assurer. En l'absence de tension extérieure, chaque jonction pn forme une couche d'arrêt. Raccordons maintenant les régions extérieures d'un transistor npn aux bornes d'une source de courant continu: la région n du côté négatif est l'émetteur, l'autre région n, côté positif, le collecteur. Pour faciliter la compréhension, il est avantageux de se représenter le transistor comme deux diodes reliées en série. Ainsi, le transistor npn peut être considéré comme une diode pn₁ (diode émetteur-base) reliée en série avec une diode pn₂ (diode base-collecteur). Vous pouvez constater que dans cet ensemble le courant est bloqué dans les deux sens, et que par conséquent le courant alternatif ne peut passer.

Fig. 57 Sens du déplacement des électrons et des trous dans un transistor npn. Le nombre des recombinaisons par seconde dans la base (B) détermine l'intensité du courant de base (I_B). Les électrons qui ne se recombinent pas avec des trous pénètrent dans le collecteur et déterminent l'intensité du courant de collecteur (I_C).
Flèches rouges: sens de déplacement des électrons.
Flèches noires: sens de déplacement des trous.



Essayez vous-même de déterminer, pour une polarisation donnée, quelle couche d'arrêt entre en jeu. Sûrement vous étonnerez-vous de ce que, après inversion de polarité, émetteur et collecteur soient automatiquement permutés. On dit d'un transistor fonctionnant de cette manière qu'il est "chargeable symétriquement". Vous verrez plus tard que cette symétrie n'existe pas pour tous les types de transistors.

Si maintenant on applique en supplément une tension (U_{EB}) entre la connexion de l'émetteur (A_E) et la connexion de la base (A_B), de telle sorte que la base du transistor npn soit positive par rapport à l'émetteur mais négative par rapport au collecteur, le transistor perd son efficacité de blocage. U_{EB} détermine un courant électronique — le courant de base (I_B) — s'écoulant de l'émetteur vers la base. Ce courant résulte de la recombinaison du flux d'électrons avec des trous de la base semi-conductrice p. Mais tous les électrons qui affluent de l'émetteur dans la région base ne se recombinent pas: au contraire, une partie d'entre eux traversent la base, transpercent la couche d'arrêt de la jonction pn_2 et sont recueillis par le collecteur. Ils s'écoulent ensuite par la connexion A_C . C'est de sa fonction, consistant à

rassembler et à acheminer les porteurs de charge, que le collecteur a tiré son nom (lat. collectus = collecte). Par contre, l'émetteur est l'"expéditeur" des charges électrique (lat. emittere = émettre).

Vous ne manquerez pas de trouver surprenant que des porteurs de charge puissent franchir la couche d'arrêt de la jonction pn_2 . Il ne s'agit ici, en aucune manière, du courant inverse habituel dû à la conduction intrinsèque, mais bien du courant de collecteur provenant directement de l'émetteur et circulant dans le même sens que le courant inverse dont il surclasse de beaucoup l'intensité. La jonction pn_2 est alors plus ou moins conductrice, suivant l'intensité du courant de base. En d'autres termes, la résistance de la couche d'arrêt de la diode base-collecteur dépend étroitement de l'intensité du courant de base. Cette résistance, dépendant de l'intensité, a été nommée par Shockley "transfer resistor", d'où l'on a tiré l'appellation "transistor".

Suivant le schéma, la courant d'émetteur (I_E) se divise dans la base, comme représenté au point de jonction K_1 . A partir de la base, le courant de base (I_B) s'écoule vers la connexion de base, tandis que l'autre partie du courant atteint le collecteur et prend le nom de courant de collecteur (I_C). Au point de jonction K_2 , les deux courants se réunissent à nouveau pour constituer le courant d'émetteur. On peut donc écrire:

courant d'émetteur = courant de base + courant de collecteur

$$I_E = I_B + I_C$$

Fig. 58 Schéma de bifurcation du courant pour le transistor npn. Exceptionnellement, c'est le sens du courant électronique qui est ici indiqué par les flèches.

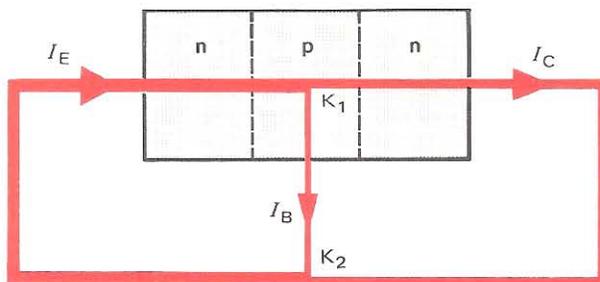
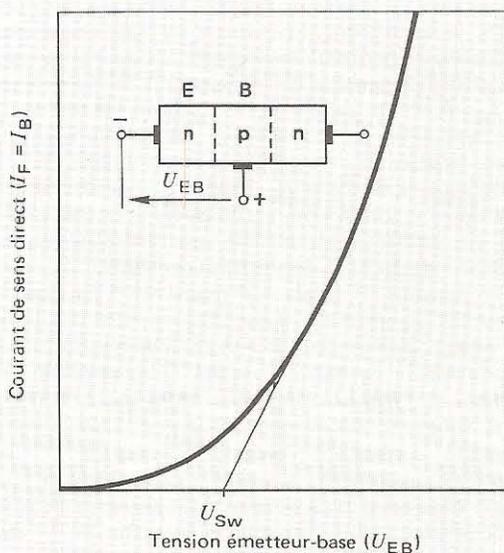
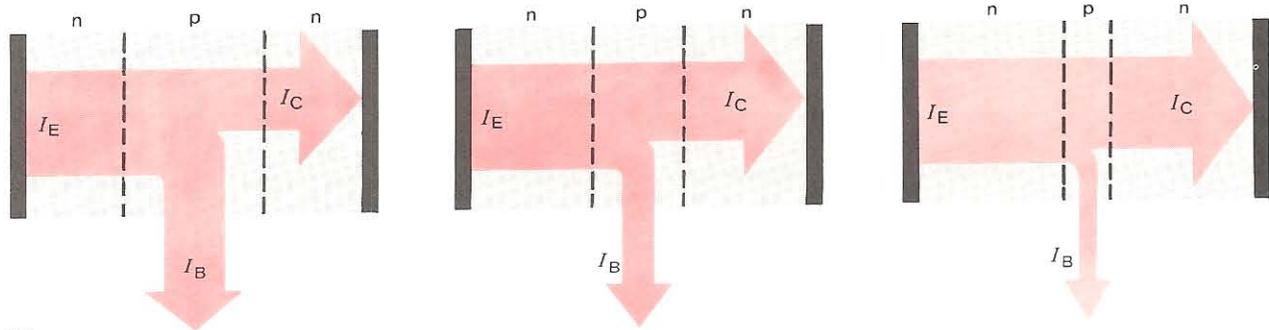


Fig. 59 Courbe caractéristique de la diode émetteur-base d'un transistor npn dans le sens direct. Remarquez que la base est ici positive par rapport à l'émetteur.



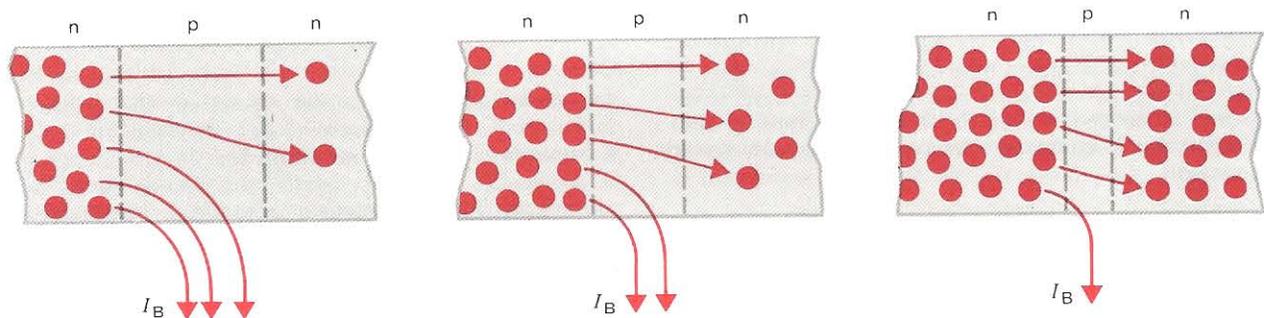
L'intensité du courant de base est fonction de la tension émetteur-base (U_{EB}). Lorsque $U_{EB} = 0$, il n'y a aucun courant de base et par conséquent pas de courant d'émetteur ni de courant de collecteur. Lorsque la tension de base s'accroît, le courant d'émetteur s'élève très rapidement et il atteint déjà une très grande intensité à partir de la tension de seuil (U_{Sw}). La représentation graphique de ce courant n'est d'ailleurs pas différente de la courbe caractéristique d'une diode polarisée dans le sens direct, telle que le montre la figure 59. Plus le courant d'émetteur est intense et plus il parvient d'électrons au collecteur à travers la base à semiconducteur p par l'intermédiaire de la jonction pn_2 . Il s'ensuit que le courant de collecteur dépend également très étroitement de U_{EB} et par là même de I_B . Si l'on fait en sorte que beaucoup plus d'électrons parviennent au collecteur qu'il ne s'en écoulent par la connexion de base A_B , on constate immédiatement une très importante propriété du transistor, à savoir son aptitude à amplifier le courant électrique: un faible courant de base détermine un fort courant de collecteur (I_C). En gros, l'amplification s'exprime par l'égalité $V_1 = I_C/I_B$. Un coefficient d'amplification $V_1 = 100$ n'est plus aujourd'hui exceptionnel.

Mais comment peut-on donc obtenir une amplification aussi forte, qui fait en sorte que le courant s'écoulant par la connexion de base ne comporte qu'un pour cent seulement des porteurs de charge alors que 99 % de ces porteurs se dirigent vers le collecteur? Ce résultat est obtenu par le stratagème suivant: on donne à la région base une épaisseur aussi réduite que possible, ce qui élève la résistance opposée aux électrons dans le sens de la connexion base et, en conséquence, favorise leur passage vers le collecteur. Il est ici très important que l'épaisseur de la base soit inférieure au rayon d'action des électrons en diffusion au travers de celle-ci. Elle est de l'ordre de 10μ environ, c'est-à-dire 0,01 mm environ. Un deuxième stratagème consiste à ne doper que très faiblement la base par rapport aux régions extérieures, ce qui raréfie les recombinaisons et permet d'obtenir une meilleure amplification.



60

61



Le transistor en amplificateur

D'après les données que nous venons d'exposer, la propriété amplificatrice du transistor ressort du fait qu'un faible courant permet d'obtenir un courant beaucoup plus intense. Cette propriété a fait du transistor un composant d'utilisation quasi universelle en électronique. Jusqu'à présent, nous ne vous avons fait connaître que les phénomènes physiques relatifs au facteur d'amplification en *courant* (V_I). Mais avec le transistor, on peut également amplifier les tensions et les puissances électriques. Si V_U représente l'amplification en tension, l'amplification en puissance s'exprime par

$$V_p = V_U \cdot V_I.$$

En règle générale, un amplificateur électronique comporte plusieurs étages d'amplification, avec une entrée bipolaire et une sortie également bipolaire. Nous pouvons nous représenter un amplificateur sous forme d'une "boîte noire" à quatre pôles, aux bornes d'entrée de laquelle nous appliquons un signal électrique — une impulsion de courant par exemple — pour recueillir à ses bornes de sortie le même signal amplifié. D'après ce que nous avons vu plus haut, le transistor individuel constitue déjà un amplificateur, en fait le plus simple qu'on puisse imaginer. Alors qu'un amplificateur possède quatre bornes, le transistor ne possède que trois connexions. En conséquence, l'une des trois connexions du transistor doit être reliée à une borne d'entrée et à une borne de sortie. On en déduit les trois montages amplificateurs fondamentaux du transistor:

- montage en émetteur commun
- montage en collecteur commun
- montage en base commune.

Tous les montages amplificateurs plus complexes se déduisent de ces trois montages types. C'est le montage en émetteur commun qui est le plus fréquemment utilisé, car il permet aussi bien d'obtenir une forte amplification en courant qu'une forte amplification en tension, et par conséquent une forte amplification en puissance. Par contre, avec le montage en collecteur commun et le montage en base commune, seule est

possible l'amplification en courant ou l'amplification en tension. Ces deux derniers montages types ont néanmoins leur domaine particulier d'utilisation en électronique.

En ce qui concerne le montage fondamental le plus important, le *montage en émetteur commun*, nous vous dirons succinctement comment il permet d'obtenir aussi bien une forte amplification en courant qu'une forte amplification en tension. Le courant est amplifié au maximum quand le circuit du collecteur ne présente qu'une résistance très faible, c'est-à-dire pratiquement un court-circuit. C'est pourquoi l'amplification maximum du courant est aussi appelée "amplification à rapport de transfert direct". La condition première est que la source de courant soit capable de débiter une forte intensité dans le circuit collecteur et que les connexions, et bien sûr le transistor lui-même, puissent supporter sans dommage le courant intense dont il s'agit. Pour l'amplification en tension, il faut intercaler une résistance (R_C) dans le circuit collecteur, comme indiqué à la figure 62. D'après la loi d'Ohm, une chute de tension se produit aux bornes de la résistance lorsque le courant la traverse. Cette chute de tension correspond à la tension de sortie: $U_a = I_C \cdot R_C$. La valeur de la tension de sortie — de même que celle par conséquent du facteur d'amplification en tension $V_U = U_a / U_{EB}$ — est d'autant plus élevée que les valeurs de I_C et R_C sont elles-mêmes plus fortes. Néanmoins, il serait vain d'utiliser dans ce cas une résistance de valeur illimitée, car cela entraînerait l'affaiblissement de I_C et la diminution du facteur d'amplification en tension. Il serait également vain de chercher à obtenir un courant I_C aussi intense que possible, car pour cela il faudrait choisir une résistance plus faible. En effet, la chute de tension serait alors minimale dans la résistance et l'amplification peu importante. Il n'y a pas d'autre solution que de calculer la résistance optimale — c'est-à-dire la résistance correspondant à l'amplification en tension maximum. Le plus souvent, on utilise un procédé beaucoup plus simple, qui consiste à déterminer graphiquement cette résistance à partir de la courbe caractéristique du transistor considéré.

Fig. 60 Les deux parties du courant I_B et I_C varient au bénéfice de I_C lorsqu'on réduit la région base, c'est-à-dire lorsqu'on en réduit l'épaisseur. Les flèches indiquent le sens du courant électronique.

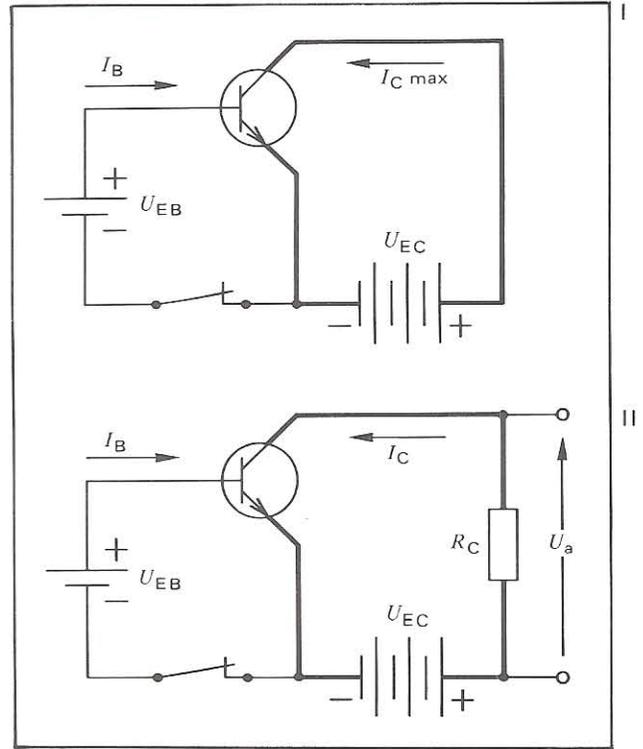
Fig. 61 Plus on réduit l'épaisseur de la base et moins les électrons et les trous ont la possibilité de se recombiner et, en conséquence, d'autant plus faible est la partie I_B du courant total I_E .

Fig. 62 Représentation simplifiée du fonctionnement du transistor npn monté en émetteur commun.

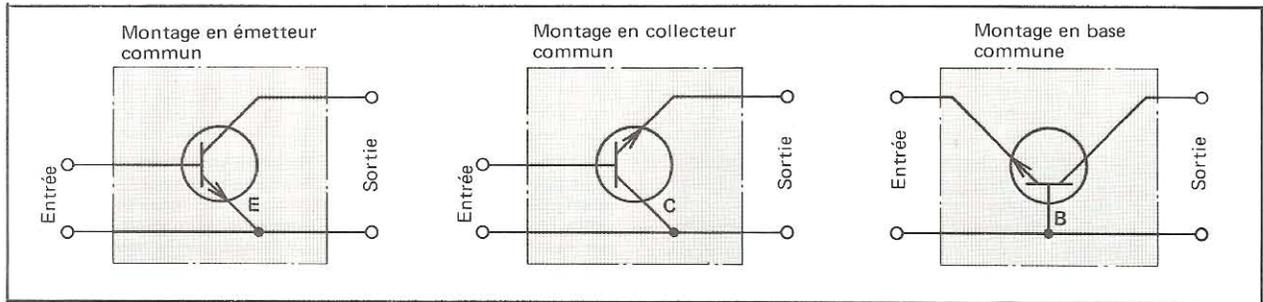
- I Amplification en courant à rapport de transfert direct
- II Amplification en tension

Fig. 63 Les trois montages fondamentaux du transistor. Exemples de montage du transistor npn.

Fig. 64 Exemple de famille de courbes caractéristiques d'un transistor. La tension U_{EC} ne peut être augmentée à volonté, car le transistor subirait un échauffement excessif qui provoquerait sa destruction. C'est pourquoi U_{EC} est limitée par la courbe de puissance dissipée maximum ($P_V \text{ max}$). Les limites de U_{EC} sont d'autant plus étroites que les valeurs de I_C et I_B sont élevées. On choisit la tension de batterie U_{Batt} et la résistance du collecteur R_C de manière que la puissance dissipée $P_V \text{ max}$ ne soit jamais atteinte en service permanent. Le mode de fonctionnement du transistor dépend donc dans une large mesure de ces valeurs, représentées par la droite de charge (WG) pour $U_{Batt} = 8 \text{ V}$ et $R_C = 200 \Omega$ dans l'exemple de cette figure. U_{EC} est donc à tout instant donnée par la chute de tension dans la résistance du collecteur. Soit $U_{EC} = U_{Batt} - I_C \cdot R_C$.



62



63

Si vous avez compris l'effet d'amplification du transistor en version npn que nous venons de décrire, vous pouvez essayer de déterminer le mouvement des porteurs de charge et le partage du courant dans le transistor pnp. N'oubliez pas alors de polariser correctement ce transistor. Ne perdez pas trop de temps à vous demander pourquoi les jonctions métalliques (A_E, A_C) n'admettent et ne transfèrent que des électrons et pas un seul trou, tandis que l'émetteur en tant que semiconducteur du type p envoie des trous vers la base. La chose est relativement compliquée du fait qu'il existe à la limite contact métal/semiconducteur une autre jonction pn dont nous ne pouvons parler dans le cadre de cette notice technique.

Le mode de fonctionnement des transistors npn et pnp est similaire. Les transistors pnp sont le plus souvent au germanium et les transistors npn au silicium.

La couche d'arrêt de la jonction pn_2 laisse non seulement les porteurs de charge parvenir de l'émetteur au collecteur, mais elle possède également — comme toute couche d'arrêt — une conduction intrinsèque résultant de la formation de paires électron-trou et qui se manifeste, surtout dans la gamme des températures élevées, par un courant perturbateur de sens inverse d'intensité plus accentuée. Ceci se rapporte particulièrement au transistor utilisé comme commutateur. Le courant intense dont il s'agit est appelé aussi "courant résiduel de collecteur" du transistor. Pour les transistors qui doivent supporter des températures élevées, le silicium est particulièrement indiqué. C'est la raison pour laquelle on utilise de plus en plus actuellement des transistors au silicium en électronique automobile.

64

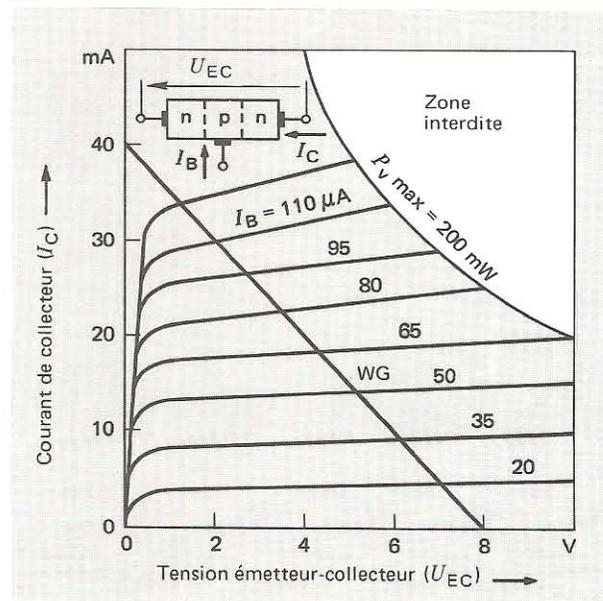




Fig. 65 Enregistreur de caractéristiques "Tektronix".

Un transistor ne possède pas qu'une seule courbe caractéristique, comme c'est le cas par exemple pour la diode, mais bien une famille entière de caractéristiques — et cela parce que son courant de collecteur (I_C) est fonction de deux grandeurs, à savoir la tension de collecteur (U_{EC}) et le courant de base (I_B). Si l'on maintient le courant de base à une valeur constante, la fonction est à peu près linéaire pour de faibles valeurs de U_{EC} (portion de courbe montante droite). Si l'on continue à faire croître la valeur de U_{EC} , la courbe s'incline subitement jusqu'à l'horizontale — ce qui montre que le courant de collecteur n'est plus dorénavant influencé par la croissance de la tension: on a atteint la saturation. Le courant de saturation — en tant qu'expression du pouvoir amplificateur du transistor — est d'autant plus intense qu'on a donné une valeur plus élevée au courant de commande I_B . Chaque type de transistor a sa famille de caractéristiques, qui permet au spécialiste de voir d'un coup d'œil dans quel cas et de quelle manière le transistor peut être utilisé (fig. 64).

Pour pouvoir tracer une telle famille de courbes, il est nécessaire de mesurer de nombreuses valeurs et c'est par conséquent un travail qui requiert beaucoup de temps. Depuis peu, on dispose d'un moyen beaucoup plus simple. Il existe en effet sur le marché un appareil spécial, proche parent de l'oscilloscope cathodique, qui "dessine" immédiatement la caractéristique ou la famille de caractéristiques de n'importe quel composant électronique. Il s'agit de l'enregistreur de caractéristiques.

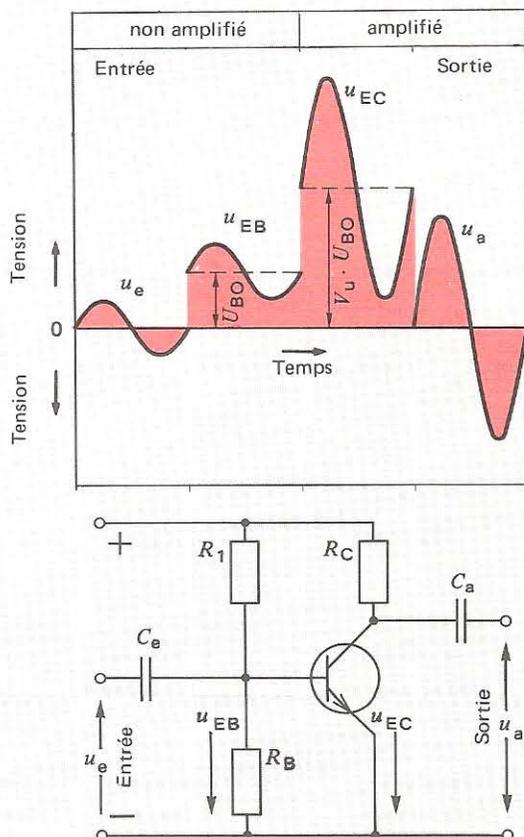


Fig. 66 De par son mode de fonctionnement, le transistor ne peut pas amplifier directement le courant alternatif et la tension alternative. En effet, si l'on appliquait une tension alternative entre émetteur et base, la base changerait constamment de signe par rapport à l'émetteur. Or, nous savons que la base d'un transistor npn doit être constamment positive et que la base d'un transistor pnp constamment négative pour permettre la circulation d'un courant de collecteur. Mais aussitôt que la tension de base devient nulle, ou que la base change de signe, une couche d'arrêt se forme à la jonction pn_1 et le courant de collecteur est bloqué. On empêche ce blocage par l'alternance opposée du courant alternatif en donnant à la base "tension de polarisation" continue (U_O), positive dans le cas du transistor npn et négative pour le transistor pnp. U_O représente la chute de tension provoquée par le passage du courant de repos de base (I_{B0}) dans la résistance R_B . La tension alternative à amplifier U_e est simplement superposée à la tension de polarisation par l'intermédiaire du condensateur de liaison C_e et des fluctuations amplifiées de courant continu prennent naissance dans le circuit émetteur-base. On prélève la tension de sortie amplifiée derrière le condensateur de liaison C_a . En fermant la sortie de l'amplificateur au moyen d'une résistance de charge (R_L), on obtient le courant alternatif amplifié. Pour simplifier la figure, nous nous sommes bornés à représenter seulement les tensions en les caractérisant par des flèches. Les flèches de tension positive n'indiquent qu'un seul sens, les flèches de tension alternative indiquent deux sens.

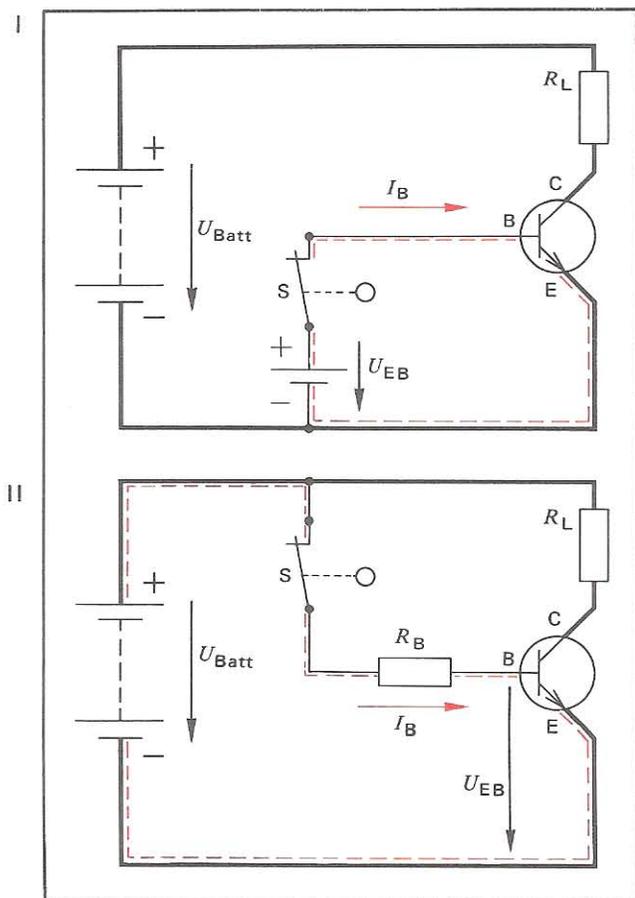
Le transistor comme commutateur

Le fonctionnement d'un transistor en interrupteur électronique représente le cas limite d'une amplification de courant. Il ne s'agit ici que de deux phases de travail: "marche" et "arrêt". Pendant la durée d'enclenchement, on commande le transistor au moyen d'une tension continue constante (U_{EB}), par exemple par la fermeture des contacts d'un interrupteur (S) intercalé dans le circuit émetteur-base. Dans le cas du transistor npn, la base est positive par rapport à l'émetteur et elle est négative dans le cas du transistor pnp. La forte intensité du courant de collecteur est limitée par une résistance de charge (R_L). Lorsqu'on veut couper ce courant, il suffit, dans beaucoup de cas, de supprimer la tension de commande (U_{EB}) par ouverture des contacts de l'interrupteur (S): le circuit de base étant coupé, le transistor bloque. Toutefois, la plupart du temps, on impose à l'interrupteur des exigences qu'un interrupteur mécanique, même pourvu des meilleurs contacts, ne peut que très difficilement satisfaire: puissance de commande électrique élevée et nombre important de coupures à la minute. Le transistor de commutation (transistor interrupteur) peut non seulement commander un courant intense, mais il peut assurer cette commande avec une très grande rapidité, c'est-à-dire instantanément. Il a cet avantage indubitable sur l'interrupteur mécanique de ne pas comporter de pièces mécaniques en mouvement occasionnant toujours une certaine inertie de coupure.

Fig. 67 Transistor npn utilisé comme interrupteur, vu en position de commutation *Marche*. La base est *positive* par rapport à l'émetteur.

I Schéma de principe avec deux sources de courant: courant de commutation (I_C) et courant de commande (I_B). I_B est représenté en traits discontinus.

II Schéma de principe avec une seule source de courant. La tension $I_B \cdot R_B$ chute dans la résistance de base (R_B). On a donc $U_{EB} = U_{Batt} - I_B \cdot R_B$.



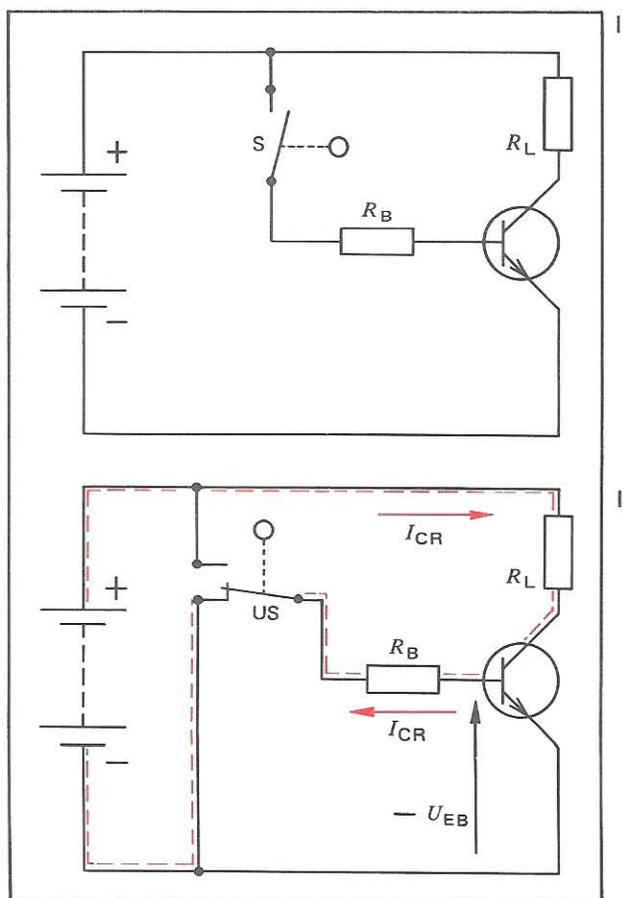
Le transistor mérite sans conteste la dénomination "interrupteur rapide". Il présente toutefois, bien que très petite, une inertie de coupure qui est occasionnellement gênante dans la gamme des fréquences de coupure très élevées. Cette inertie provient du fait que la disparition de la couche d'arrêt à la fermeture du circuit, ainsi que sa formation à l'ouverture exigent un certain délai. Pour pallier cet inconvénient, on applique, durant la phase de coupure, une polarisation entre émetteur et base afin de rendre la base négative dans le cas du transistor interrupteur npn. De cette manière, le transistor assure la commutation avec une plus grande rapidité. La figure 68 II montre comment on peut obtenir une telle polarisation: dans la résistance (R_B), on fait chuter, par rapport à l'émetteur, une tension dont la valeur est représentée par le produit $R_B \times I_{CR}$.

Transistor de commutation	Interrupteur (S)	Polarité de la base par rapport à l'émetteur
npn	marche	positive
	arrêt	nulle ou négative
pnp	marche	négative
	arrêt	nulle ou positive

Fig. 68 Transistor npn utilisé comme interrupteur, vu en position de commande *Arrêt*.

I La base est ouverte, le transistor bloque par la couche d'arrêt de la jonction pn_2 base-collecteur (diode base-collecteur).

II La base est reliée à l'émetteur par l'intermédiaire de R_B et du commutateur (US). R_B provoque la chute de tension $-U_{EB} = I_{CR} \cdot R_B$. La tension $-U_{EB}$ est très petite du fait que le courant résiduel de collecteur (I_{CR}) est très faible. Dans ce cas, la base est légèrement négative et le transistor bloque mieux et plus rapidement.



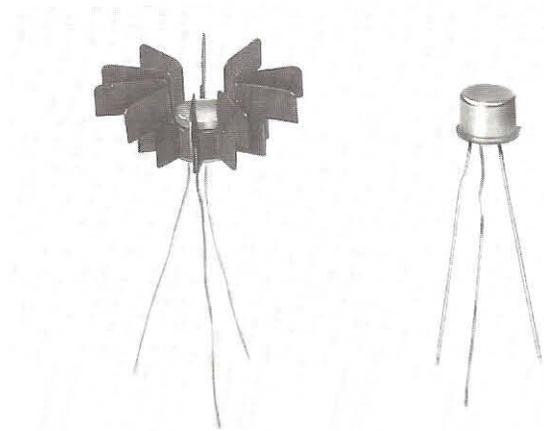


Fig. 69 Transistor avec et sans ailettes de refroidissement.

Fig. 70 Dans le transistor de commutation, une puissance électrique se transforme en chaleur et se dissipe donc (puissance dissipée P_v). Le diagramme I montre qu'une certaine puissance est consommée même à l'arrêt. Pendant le processus de commutation, P_v prend momentanément une valeur particulièrement grande (pointes de commutation). Des pointes excessivement élevées se produisent lorsque le circuit de commutation est chargé en plus inductivement ou capacitivement. Les pointes de commutation de valeur excessive mettent le transistor en danger et doivent être par conséquent réduites par des mesures appropriées. Voici trois cas typiques de charges de commutation dans le circuit du collecteur:

I Charge ohmique pure due à la résistance de charge R_L . En règle générale, les pointes de commutation qui se produisent à la fermeture ("Marche") ou à la coupure ("Arrêt") du circuit sont inoffensives pour le transistor.

II Charge inductive prédominante due à l'inductance L d'un enroulement de fil avec noyau de fer (par exemple bobine d'allumage). En coupant le circuit, c'est-à-dire au blocage du courant de collecteur, une pointe de courant de commutation très élevée se produit, qu'on peut neutraliser au moyen d'une diode (D). Celle-ci met la pointe de commutation en court-circuit car l'enroulement au cours de la chute du courant devient une

Le transistor fonctionnant en interrupteur doit remplir les exigences suivantes:

A la phase de mise en circuit, production d'un courant de collecteur intense à partir d'un courant de base relativement faible.

Rigidité diélectrique importante à la phase de coupure du circuit, le courant résiduel de collecteur étant alors aussi faible que possible (problèmes de température).

Inertie de commutation aussi réduite que possible. Le transistor doit être obligatoirement protégé contre les surtensions qui se manifestent lors du processus de commutation.

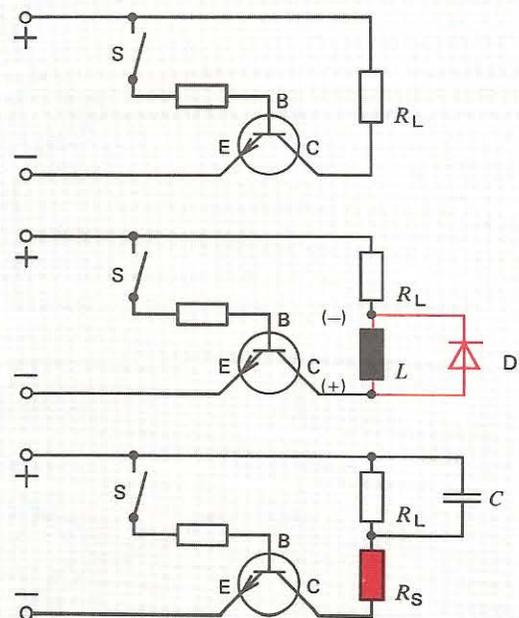
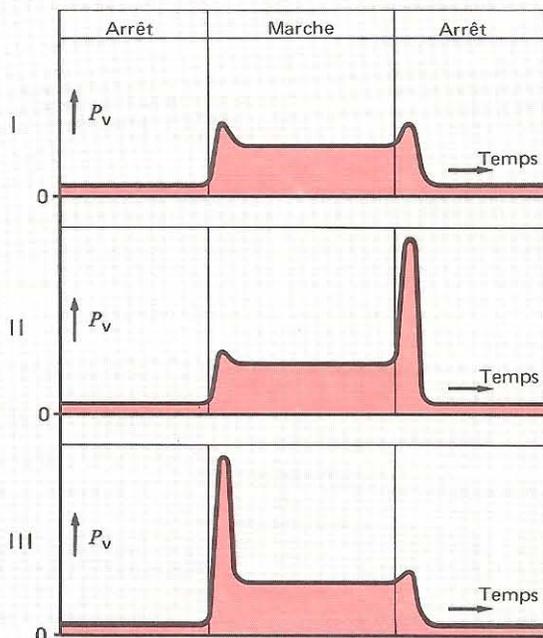
La chaleur due à l'effet Joule qui se développe dans le transistor doit être suffisamment bien dissipée pour qu'aucun surchauffement n'intervienne, même en service permanent.

Résumé:

- Le transistor se compose de trois régions de semi-conducteurs dans l'ordre npn ou dans l'ordre pnp.
- Les régions de semi-conducteurs du transistor possèdent chacune, en général, une connexion individuelle. On les nomme émetteur, collecteur et base.
- Le transistor est utilisé pour l'amplification du courant, de la tension et de la puissance ainsi que comme interrupteur rapide.

source de courant. La diode dévie cette pointe de courant d'induction qui se produit dans le sens du courant précédent et l'éloigne donc du transistor. Les diodes qui ont cette fonction sont appelées diodes de récupération.

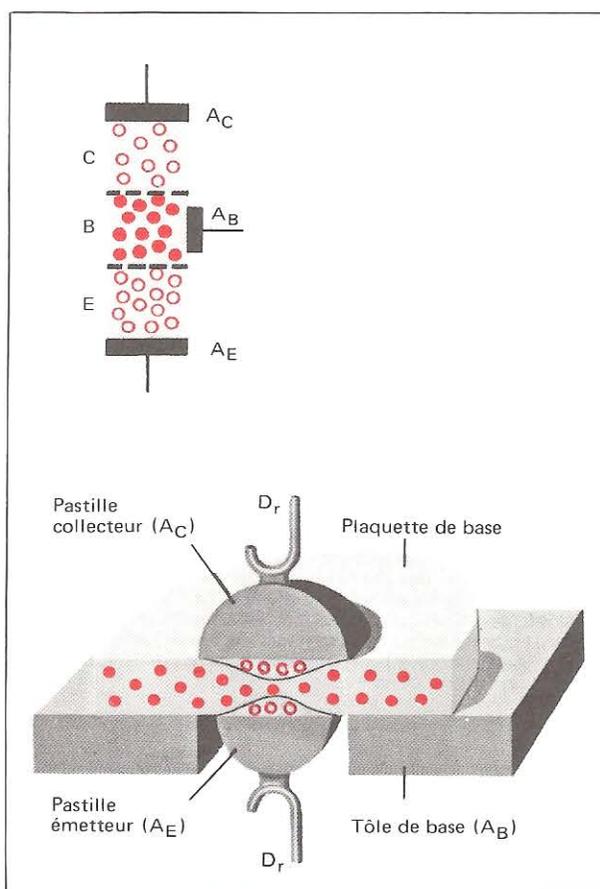
III Charge capacitive prédominante due à un condensateur de capacité C . Ici, c'est à l'établissement du courant qu'une très forte pointe de commutation se manifeste. Celle-ci peut être absorbée par une résistance série (R_S) par exemple.



Le transistor allié

La figure 71 représente en coupe la structure schématique d'un transistor. Il s'agit ici d'un transistor dit "allié", dont la particularité est de posséder une propriété de symétrie, c'est-à-dire que l'émetteur et le collecteur peuvent être permutés par inversion de la polarité de la tension U_{EC} . Vous retrouvez ici tous les éléments habituels représentés schématiquement: l'émetteur (E), la base (B), le connecteur (C) avec les connexions correspondantes (A_E, A_B, A_C) et les fils de raccordement (D_r). La plaquette de base a seulement 2 mm de diamètre environ, ce qui vous permet de vous faire une idée de la réelle petitesse d'un tel composant électronique, de la facilité avec laquelle on peut l'égarer. Le composant est fixé au milieu d'une tôle qui, elle, ne saurait échapper à la vue et dont le rôle capital est d'assurer une évacuation suffisante de la chaleur qui se développe dans le minuscule transistor.

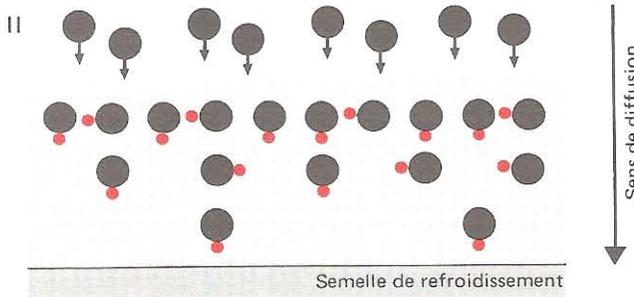
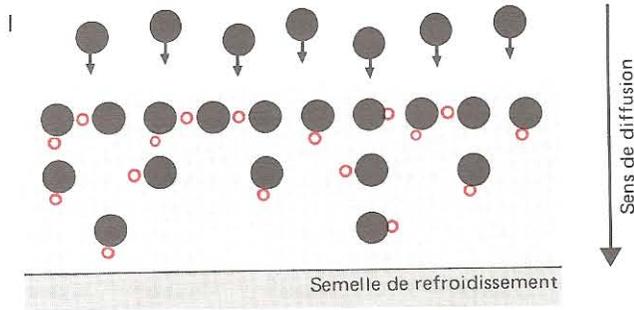
Le matériau de construction d'un tel transistor allié est un cristal semiconducteur — germanium le plus souvent — dopé en impuretés de type n ou p et affectant la forme d'une mince plaquette. Base d'appui, cette plaquette est également, au point de vue technique, la base (B) du transistor, ainsi nommée dès l'origine du fait de sa forme. De chaque côté de la plaquette, on dépose une très petite bille de matière dopante. Ces deux "pastilles", de taille différente, sont alliées à la base sous l'effet d'une haute température et elles tiennent lieu également de connexions (A_E, A_C). Un transistor pnp ainsi réalisé a donc une base qui a été préalablement dopée avec un donneur, antimoine par exemple, pour en faire un semiconducteur de type n. Les deux pastilles sont constituées d'un accepteur, indium par exemple. La pastille du collecteur a été choisie un peu plus grosse que celle de l'émetteur, afin qu'un nombre aussi grand que possible de porteurs de charge — des trous en l'occurrence — passent de l'émetteur à la région collecteur et ne renforcent pas le courant de base. L'incorporation des pastilles a créé les deux régions extérieures de type p. On soude ensuite les fils de connexion D_r aux pastilles. Le transistor ainsi fabriqué est soudé à l'étain au milieu de la tôle percée. On adopte ce mode de fixation pour les transistors alliés jusqu'à la puissance maximum d'un watt. Les transistors qui excèdent cette puissance, appelés précisément "transistors de puissance", sont soudés par leur pastille côté collecteur sur le fond du boîtier, celui-ci étant le plus souvent en contact avec la masse. C'est pourquoi les transistors de puissance sont fixés au châssis sur une tôle de refroidissement individuelle montée isolée ou sur une plaquette de mica isolante.



Vous vous êtes peut-être étonné de ce que la base du transistor allié ait reçu un double dopage: primo le léger dopage préalable de la plaquette de base et secundo le fort dopage par alliage réalisé au moyen des pastilles. Mais cela ne regarde en rien le type de conduction de l'émetteur et du collecteur; car, en définitive, ce sont toujours les atomes d'impureté représentant le taux de dopage le plus élevé qui déterminent le type n ou p du cristal semiconducteur. L'ordre dans lequel les opérations du dopage multiple sont effectuées ne joue ici aucun rôle.

Le transistor allié est principalement utilisé dans le domaine des basses fréquences comme amplificateur de courant et pour les grandes puissances. Par contre, il ne convient pas pour l'amplification en haute fréquence, ni pour remplir la fonction d'un interrupteur rapide, en raison de la grande capacité de sa couche d'arrêt. De plus, comme le parcours du courant est très long à travers la base qui est relativement épaisse, la durée de transit des porteurs de charge, qui est grande par conséquent, cause d'autant plus de perturbation que la fréquence s'élève. Afin de réduire la capacité, on a créé, depuis des années déjà, un élément transistor inspiré de la diode à pointe et appelé "transistor à pointe". Mais celui-ci ne s'est pas imposé en pratique; on a pu effectivement réduire la capacité, mais le long trajet du courant à travers la base subsiste. Il s'est avéré d'importance primordiale d'obtenir une base aussi mince que possible et on a recherché un procédé permettant de satisfaire cette exigence. C'est ainsi qu'on a abouti au transistor à diffusion.

Fig. 71 Transistor allié (pnp).



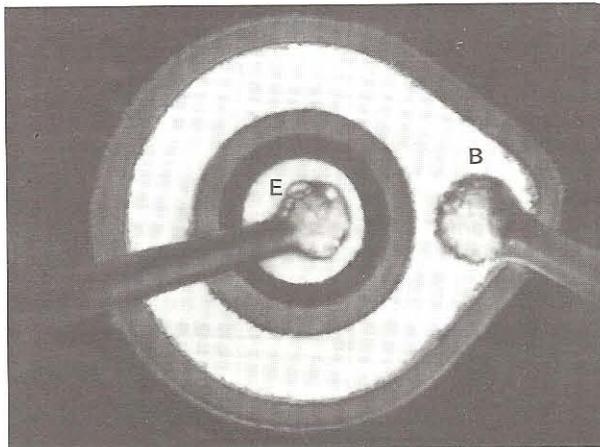
72

Le transistor à diffusion

Le cristal semiconducteur de silicium ou de germanium extra-pur est dopé par diffusion d'atomes donneurs ou accepteurs dans le but, par exemple, de créer une base extrêmement mince. La diffusion s'effectue de la manière suivante: en premier lieu, les atomes, à l'état gazeux, liquide ou solide, sont mis au contact de la surface du cristal; ils pénètrent dans le cristal et s'y diffusent en profondeur, créent des zones d'impuretés et déterminent ainsi la conduction extrinsèque. Nous retiendrons que:

- les impuretés donatrices déterminent la semiconduction du type n
- les impuretés acceptrices déterminent la semiconduction du type p.

Lorsque la diffusion est achevée, on refroidit le semiconducteur à la température ambiante. Les atomes d'impuretés ne peuvent plus alors poursuivre leur pénétration parce que les forces de valence les fixent dans le cristal; le processus de dopage est en quelque sorte "gelé". Les atomes d'impuretés sont relativement très rapprochés les uns des autres au voisinage de la surface; leur écartement s'accroît toutefois avec la profondeur de pénétration. Une telle répartition de la densité exerce une influence particulièrement favorable



73

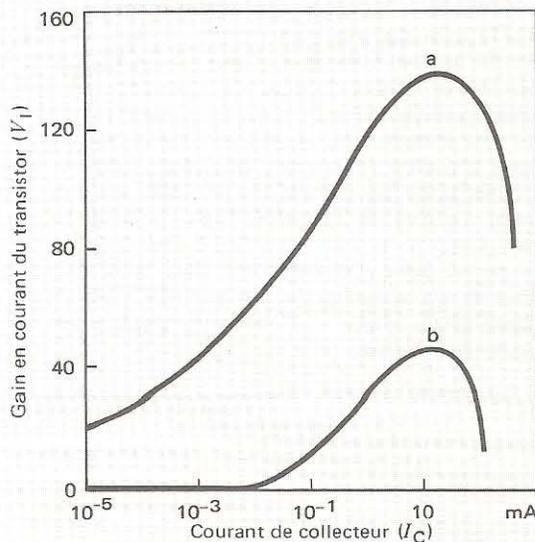
74

Fig. 72 Dopage par diffusion:
I Dopage de type p par diffusion d'atomes accepteurs
II Dopage de type n par diffusion d'atomes donneurs.

Fig. 73 Microcliché d'un transistor planar.

A gauche: connexion d'émetteur
A droite: connexion de base
La connexion de collecteur se trouve de l'autre côté.
Diamètre de la base: 0,1 à 1 mm, suivant le type de transistor.

Fig. 74 Gain en courant de transistors en fonction de l'intensité du courant de collecteur (I_C).
a) Transistor planar au silicium
b) Transistor allié



40

Implantation d'ions

Un nouveau procédé de dopage s'est récemment développé et a supplanté tous les autres procédés utilisés jusque là. Cette nouvelle méthode est appelée "implantation d'ions" — c'est-à-dire implantation d'atomes étrangers par bombardement d'un monocristal de silicium au moyen d'ions accélérés. Dans ce procédé, on ionise des atomes donneurs ou accepteurs sous vide très poussé et on les accélère au moyen d'un champ électrique. Leur énergie cinétique est si forte lorsqu'ils rencontrent la surface du cristal qu'ils traversent même une couche protectrice de quartz et pénètrent profondément dans le cristal. L'implantation d'ions présente des avantages décisifs:

le dopage s'effectue à la température ambiante;

le procédé est rapide, ce qui permet une grande capacité de production;

le degré de dopage voulu peut être exactement réglé;

grande pureté chimique de la jonction pn, l'implantation étant effectuée à travers la couche protectrice de quartz.

sur le déplacement des porteurs de charge quand la région de cristal dopée se trouve être en même temps la région de base. Nous étudierons la fabrication pratique en examinant successivement les étapes de fabrication du transistor npn au silicium.

Le transistor planar

Le transistor npn au silicium dopé par diffusion est appelé, d'après sa structure, "transistor planar". Le matériau de départ est un très petit disque de silicium n, 0,2 mm d'épaisseur et 25 mm de diamètre environ. Ce disque est un cristal à structure homogène (monocristal). Pour que vous puissiez vous représenter la taille extrêmement réduite du transistor planar, il suffira que nous vous disions que, sur un seul disque de silicium tel que nous l'avons décrit, plus de mille transistors de ce type peuvent prendre place. Les transistors planar occupent une place importante dans la miniaturisation des montages électroniques.

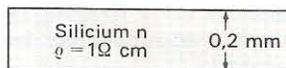
Les procédés de fabrication que nous avons décrits sont l'objet d'une automatisation très poussée; la main humaine ne serait pas capable de les appliquer avec la précision et la rapidité requises. La figure 73 est un microcliché d'un transistor planar, avec les connexions de base (B) et d'émetteur (E). La connexion de collec-

teur se trouve de l'autre côté. Après avoir suivi attentivement le déroulement des opérations de fabrication, vous vous étonnerez peut-être de ce que la fabrication du transistor planar commence par le collecteur alors que, pour le transistor allié, elle débute par la base. Le bloc-collecteur constitue en fait le support du transistor planar. Sur ce bloc reposent la base, l'émetteur et les connexions sous forme de minces couches planes. On ne s'étonnera pas de ce que les couches représentées sur les figures en coupe soient considérablement grossies. La région de base est particulièrement mince, et c'est à cela même que le transistor planar doit précisément son gain en courant élevé, encore notable même pour de faibles courants de collecteur (Fig. 74).

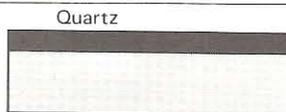
Le gain et la vitesse de commutation du transistor peuvent être encore bien augmentés si l'on réalise un dopage de type n 100 à 1000 fois plus intense du bloc de base en silicium, dont la conductivité est alors fortement améliorée. Sur ce bloc de base, on fait se déposer une couche de silicium très mince et très faiblement dopée, suivant type n, et qui n'a par conséquent qu'une conductivité très faible. Cette couche présente la même orientation cristalline que le bloc de base monocristal; on la nomme "couche épitaxiale" et son application constitue le "procédé épitaxial". La couche épitaxiale forme le collecteur, alors que le bloc de faible résistance ohmique n'a pour rôle que de supporter le transistor et d'acheminer les électrons de conduction.

Fig. 75 Schémas de fabrication de transistors planar (nnp).

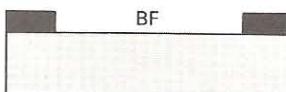
1. Le disque de silicium est découpé à la scie dans une barre de 60 cm de longueur de silicium monocristal extra-pur; on effectue ensuite le dopage du type n. Le bloc représenté à droite n'est qu'une très petite partie du disque de silicium.



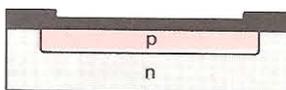
2. Oxydation de la surface. Il se forme une couche de protection en quartz (SiO_2) de 1 μ d'épaisseur environ.



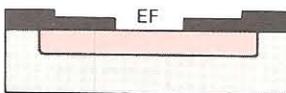
3. La couche protectrice de quartz reçoit une couche de vernis inattaquable à l'acide après exposition à la lumière. Un masque photoélectrique recouvre tous les points où les fenêtres de base (BF) devront se former. La couche ainsi recouverte est soumise à un éclairage et, après enlèvement du masque, rincée à l'acide fluorhydrique. La couche d'oxyde subsiste aux points exposés et est éliminée aux points non éclairés, les fenêtres.



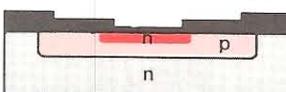
4. Par les fenêtres, on diffuse du bore comme accepteur; une région de base de type p est ainsi créée. Comme la diffusion progresse dans toutes les directions, la base, et donc la jonction pn_2 , se développe sous la couche protectrice de quartz. La diffusion se termine par une nouvelle oxydation. Une couche protectrice de quartz se dépose sur la couche de base.



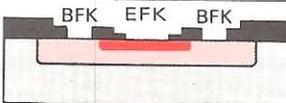
5. On renouvelle le vernissage du disque et on dépose un second masque photoélectrique sur une petite surface intérieure à la fenêtre de base protégée par une couche de quartz. Exposition à la lumière, nouvelle élimination du quartz aux points non exposés et obtention de la fenêtre d'émetteur (EF).



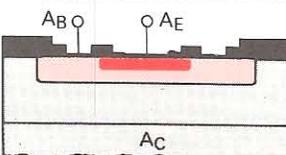
6. Diffusion de *phosphore* comme donneur par la fenêtre d'émetteur; on crée ainsi la région d'émetteur de type n. Celle-ci se développe, avec sa jonction pn_1 , sous la couche protectrice de quartz qui a été formée au cours de la quatrième étape de fabrication. La diffusion du phosphore se conclut également par une nouvelle couche protectrice de quartz.



7. Une troisième élimination libère une fenêtre de contact circulaire (EFK) pour l'émetteur et une fenêtre de contact en forme d'anneau (BFK) pour la base. Sur ces fenêtres, on vaporise un métal de contact (aluminium par exemple), auquel sera soudé par la suite les fils de connexion très fins, d'or ou d'aluminium.



8. Après contrôle électrique de tous les transistors d'un disque, celui-ci est divisé en plaquettes de cristal individuelles (chips) portant chacune un transistor. Ensuite, on dépose de l'or sur le socle du boîtier de chaque transistor individuel pour servir de connexion (Ac) de collecteur. Enfin, on met en place les fils de branchement pour la base et l'émetteur, puis on soude le chapeau du boîtier.



Durée de vie d'un composant à semiconducteur

En relation avec la technique planar, nous voudrions parler brièvement de la durée de vie des composants électroniques à semiconducteurs. En effet, plus la longévité d'un tel composant est importante et plus celui-ci est intéressant pour l'utilisateur. Le fabricant garantit une durée de vie déterminée sous réserve que les prescriptions de service et de stockage soient exactement suivies. Une trop haute température moyenne ou maximum, un courant direct trop intense, des pointes de tensions excessives de sens inverse, etc., réduisent naturellement la durée de vie des composants. De plus, au cours du temps, les jonctions pn se modifient et le fonctionnement du composant est perturbé. C'est ce qu'on appelle couramment le vieillissement. Les jonctions pn sont par exemple contaminées lorsque des atomes étrangers, un peu d'oxygène ou de cuivre, les pénètrent de l'extérieur par phénomène de diffusion incontrôlée. C'est le cas lorsque la jonction pn n'est pas protégée. Par contre, il en est tout autrement en ce qui concerne les transistors planar auxquels on appliqué le traitement prévu aux étapes de fabrication 4 et 6. Ici, à l'abri du quartz protecteur, les deux jonctions pn n'ont aucun contact avec l'extérieur; toute pollution, par quelque impureté que ce soit, est donc exclue, au cours de la fabrication même ainsi que plus tard, en service. Il en résulte que les transistors planar ont une durée de vie supérieure à celle des transistors alliés ainsi qu'un courant résiduel de collecteur beaucoup plus faible. Grâce à la couche protectrice de quartz, on peut s'abstenir de munir d'un boîtier les transistors planar de faible puissance. On se borne à les soustraire aux influences de la lumière, de l'humidité et des détériorations mécaniques en les enrobant de résine synthétique colorée.

Le thyristor

Structure de principe

Dans le domaine de l'électronique de puissance, le *thyristor*, au cours de ces dernières années, s'est imposé comme le principal représentant des composants à semiconducteurs. Il est constitué d'une série de quatre régions pnpn. Trois de ces régions sont munies de connexions électriques et s'appellent:

Anode (A), région p extérieure

Cathode (K), région n extérieure

Gâchette (G), une des deux régions intérieures.

Comportant trois jonctions pn, le thyristor est un commutateur électronique contrôlable qui possède des propriétés de redressement. Durant la phase de coupure, la tension de commutation totale règne entre anode et

cathode. Par l'intermédiaire de la gâchette, jouant le rôle d'électrode de commande, on contrôle le processus de commutation d'une manière appropriée au thyristor. Suivant la connexion de gâchette, on distingue les thyristors à gâchette p et les thyristors à gâchette n.

Lorsque l'anode est reliée au pôle positif de la source de courant et la cathode au pôle négatif, le thyristor est raccordé dans le *sens direct*. Le sens direct correspond au sens de conduction de la diode. Par contre, si l'anode est reliée au négatif et la cathode au positif, le thyristor est raccordé dans le *sens inverse*, comparable au sens de blocage de la diode. La figure 77 montre que, dans le montage en sens direct, seule la couche d'arrêt de la jonction pn *médiane* est active et bloque ainsi le courant de commutation. Dans le montage en sens inverse, les couches d'arrêt des jonctions pn extérieures sont actives, tandis que la jonction pn médiane, faiblement résistante, est conductrice. Vous comprendrez sûrement sans difficulté le comportement des couches d'arrêt car nous avons traité largement ce thème lors de l'étude de la diode et du transistor. Il est établi que le thyristor bloque dans les *deux* sens aussi longtemps que la gâchette n'est pas raccordée, c'est-à-dire qu'elle est en l'air. Un tel thyristor, non contrôlable, est appelé très simplement "diode à quatre couches". Aussitôt que la tension de blocage dans le sens direct a dépassé une certaine valeur — la tension de commutation —, la jonction pn médiane devient conductrice à cause de la génération en avalanche de paires électron-trou; la diode commute et demeure conductrice aussi longtemps que l'on ne réduit pas volontairement l'intensité du courant de commutation au-dessous de l'intensité minimum correspondant au *courant d'arrêt* (I_H). Ce comportement du thyristor non contrôlé fonctionnant dans le sens direct est caractérisé par l'allure particulière de la courbe caractéristique courant-tension. A partir de la tension de commutation, le courant intense s'établit; la tension de commutation tombe jusqu'à une très faible valeur résiduelle qui détermine l'intensité du courant de commutation. Par contre, lorsqu'il fonctionne dans le sens inverse, le thyristor a un comportement de blocage normal, comparable à celui que nous avons étudié dans le cas de la diode.

Commande du thyristor

En fonctionnement normal, la tension de commutation (U_S) du thyristor est inférieure à la tension de claquage, ce qui rend nécessaire une commande de la commutation par l'intermédiaire de la gâchette (G). Le thyristor ne peut être commandé que dans le *sens direct* et, en fait, de la manière suivante: une tension de commande (U_{GK}) est intercalée entre la gâchette p et la cathode, de manière que la gâchette soit positive par rapport à la cathode. Un courant de commande s'établit (courant de gâchette I_G); la couche d'arrêt de la jonction pn médiane est submergée par des porteurs de charge et disparaît. Le thyristor est devenu conducteur et laisse passer le courant, ce qui signifie qu'il a commuté et par conséquent fermé le circuit sans qu'aucun contact mécanique n'entre en jeu. Le courant de charge ou de commutation (I_S) qui circule alors est le plus souvent très intense. Naturellement, I_S est limité par une résistance de charge appropriée (R_L). Quant au thyristor, il est tout à fait remarquable qu'il demeure en état de commutation — c'est-à-dire amorcé — même après la coupure du courant de commande (I_G). Un courant de commande de courte durée (impulsion de commande) suffit donc pour assurer la commutation. La pratique de la commutation conduit

à limiter volontairement l'impulsion de commande, de manière à ne pas charger inutilement le thyristor. Appliquée entre gâchette et cathode, l'impulsion de commande a le même sens que le courant de commutation. Le déclenchement du courant de commutation par impulsions de commande est appelé "trigger".

La question se pose de savoir comment on peut annuler le courant de commutation? Deux procédés peuvent être utilisés. Nous avons évoqué le premier d'entre eux à propos de la diode à quatre couches; il s'agit de l'extinction par diminution du courant de commutation jusqu'à une valeur limite critique correspondant à l'intensité du courant d'arrêt (I_H). On obtient cette diminution soit en augmentant la valeur de R_L , soit en coupant le circuit de commutation. La couche d'arrêt se reforme alors immédiatement à la jonction pn médiane; elle subsiste

quand le circuit de commutation est refermé aussi longtemps que la tension de commutation n'est pas encore atteinte. Pour annuler le courant continu, on peut également commander la gâchette au moyen d'une impulsion de forte intensité et de sens opposé au courant de commutation, et qui vient réduire celui-ci à une valeur inférieure à la limite du courant d'arrêt. Ce deuxième procédé dit de "commande d'extinction", est utilisé dans les montages de commutation de groupes d'alimentation; l'impulsion d'extinction est délivrée par un condensateur ou par une bobine. En service en courant alternatif, aucune extinction forcée n'est utile, car le thyristor, au moment où le courant de commutation passe par zéro ou peu avant, commute de lui-même sur blocage. C'est pourquoi on monte surtout le thyristor dans des circuits de courant alternatif. Par décalage du moment de déclenchement (trigger) par

Fig. 76 Schémas et symboles du thyristor.

- I Thyristor à gâchette p
- II Thyristor à gâchette n

Le thyristor rappelle la lampe à trois électrodes, ou triode, autrefois très utilisée. Les électrodes de la triode étaient appelées: anode, cathode et grille de commande. Toutefois, sous le rapport du fonctionnement, le tube triode présente beaucoup plus d'analogies avec le transistor qu'avec le thyristor. Le thyristor, par contre, a plus de ressemblance avec la diode. La désignation *thyristor* est une abréviation de "thyratron" (grec = porte) et "resistor" (anglais = résistance). Le tube thyratron est le prédécesseur du thyristor.

Fig. 77 Couche d'arrêt (Sp) d'un thyristor, la gâchette étant en l'air:

- I dans le sens direct
- II dans le sens inverse

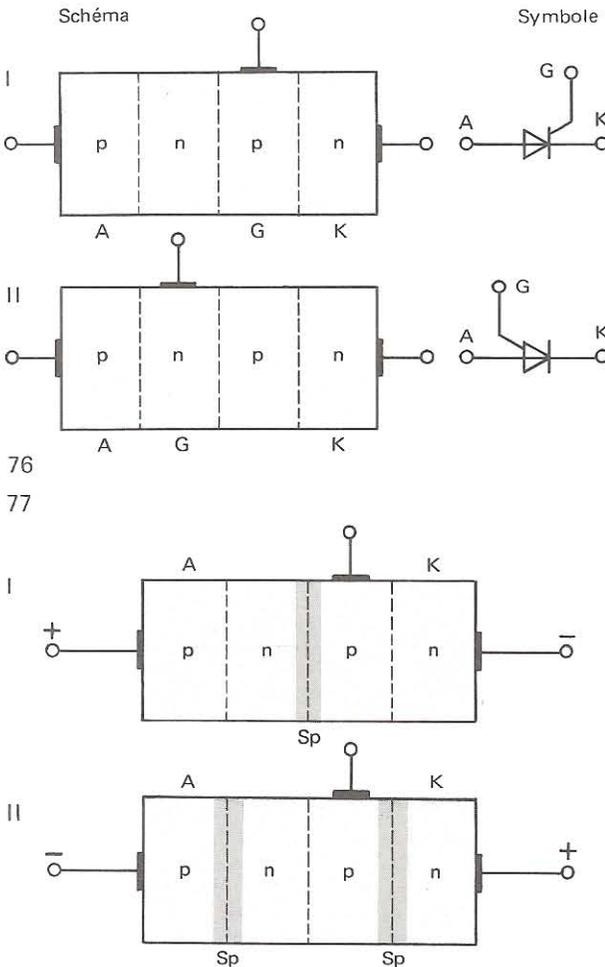
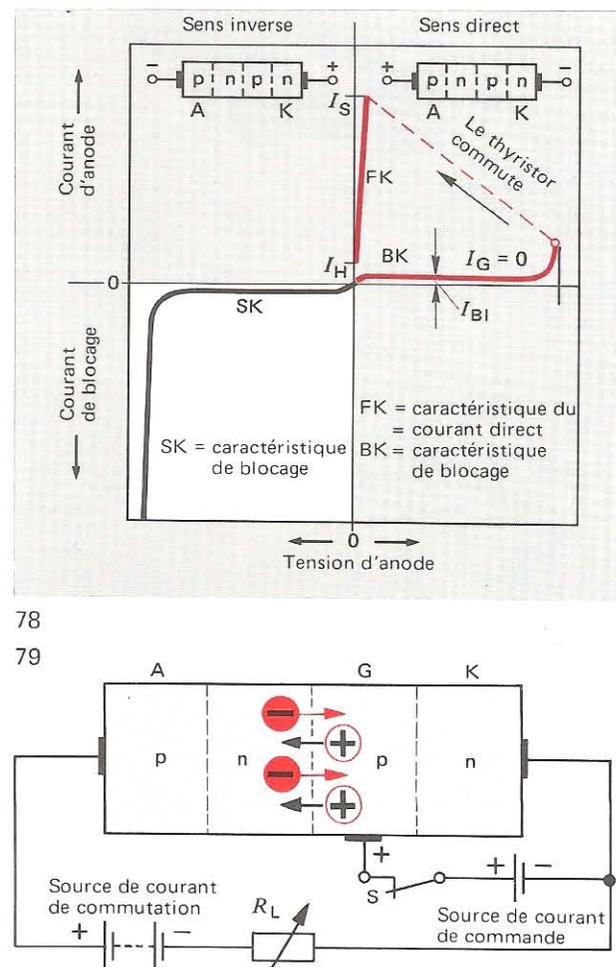


Fig. 78 Courbe caractéristique du thyristor non commandé.

A gauche, la courbe caractéristique de blocage (SK) en fonction de la tension d'anode dans le sens inverse. A droite, la courbe caractéristique plate de blocage (BK). Le courant de blocage (I_{B1}) en sens direct correspond au courant de blocage en sens inverse. Peu avant que ne soit atteinte la tension de commutation (U_S), I_{B1} s'élève quelque peu. Pour U_S , I_{B1} s'inverse en intense courant d'anode (courant de commutation I_S); le thyristor commute, ce qui est représenté par la courbe caractéristique à pente raide (FK) du courant direct. Dans le cas du thyristor non commandé, le courant de gâchette est nul: $I_G = 0$.

Fig. 79 Pour la commutation, le thyristor à gâchette p est commandé par une tension positive par rapport à la cathode; un courant de gâchette d'une certaine intensité s'établit.



rapport à la position de phase, on peut, pratiquement sans puissance, commander dans de larges limites la valeur effective du courant redressé. C'est pourquoi le thyristor convient tout particulièrement pour résoudre les problèmes de régulation et dans les cas de service par impulsions. Nous citerons parmi les utilisations possibles, le contrôle de l'éclairage, la commande et la régulation de vitesse des moteurs alternatifs.

Dans la pratique, on considère comme un grave inconvénient que le thyristor polarisé en sens inverse bloque totalement ou ne laisse passer, dans le meilleur des cas, qu'une des deux alternances, ce qui représente une perte

en puissance nominale. On pourrait bien entendu brancher un redresseur en parallèle avec le thyristor afin que, pendant la phase de blocage de celui-ci, le courant soit acheminé vers l'appareil consommateur. Mais comme le courant qui circule dans la dérivation offerte par la diode, ainsi que le montre la figure 82, ne peut être contrôlé en même temps, le domaine de réglage serait ainsi automatiquement limité, ce qui doit être évité. Le contrôle simultané du courant de l'alternance opposée peut toutefois être obtenu par l'utilisation de deux thyristors branchés parallèlement en opposition l'un par rapport à l'autre (circuit antiparallèle). L'inconvénient réside alors dans l'obligation d'utiliser deux

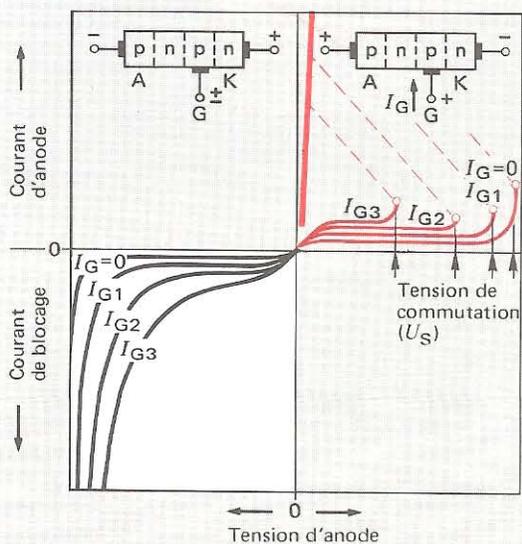
Fig. 80 Thyristor de modèle courant. Le fond du boîtier et le filetage sont reliés à l'anode; le fil de connexion le plus long correspond à la cathode, le plus court à la gâchette.

Fig. 81 Courbes caractéristiques du thyristor commandé. L'allure des courbes caractéristiques dépend de l'intensité du courant de gâchette. La figure montre les courbes caractéristiques pour les intensités de courant de gâchette $I_{G3} > I_{G2} > I_{G1}$ et, en comparaison, la courbe caractéristique gâchette en l'air, $I_G = 0$. La tension de commutation (U_S) est d'autant plus basse que l'intensité du courant de gâchette est plus élevée.

80



81

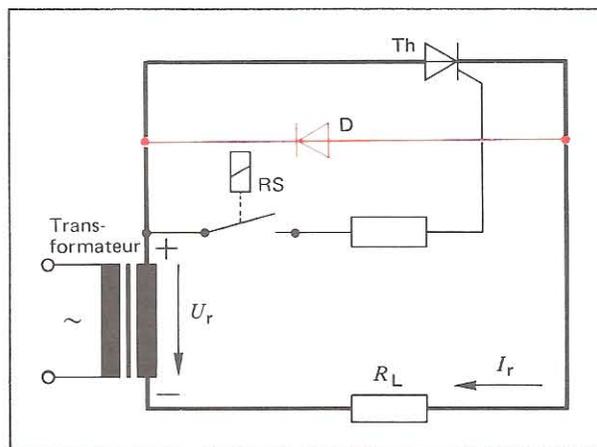


44

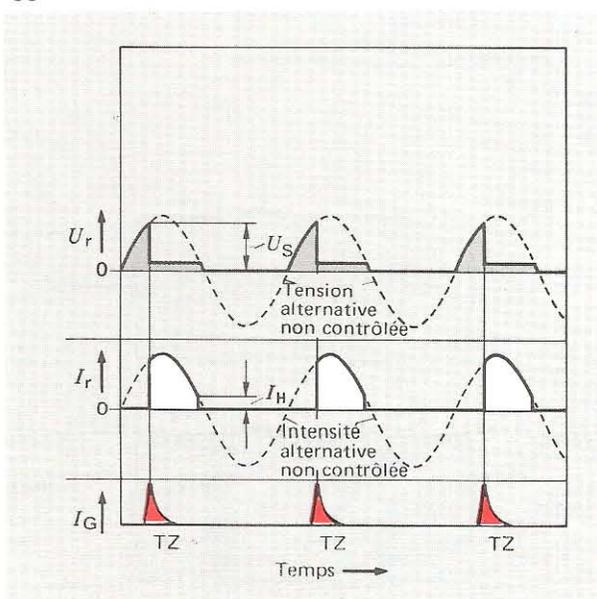
Fig. 82 Montage d'un thyristor utilisé pour la régulation en tension et en intensité d'un courant alternatif (U_r, I_r). Tension et intensité sont bloquées dans le sens inverse ou dérivées non contrôlées par l'intermédiaire d'une diode (D). Dans cet exemple, le déclenchement du thyristor (Th) est obtenu par un interrupteur électromagnétique (RS).

Fig. 83 Courbe en fonction du temps de la tension (U_r) et du courant (I_r) dans un sens. Au moment du déclenchement (TZ), la commutation commence. La tension chute jusqu'à une très petite valeur et le courant peut traverser librement le thyristor. Après que l'intensité a pris une valeur inférieure au courant d'arrêt (I_H), le thyristor bloque jusqu'au prochain déclenchement.

82



83

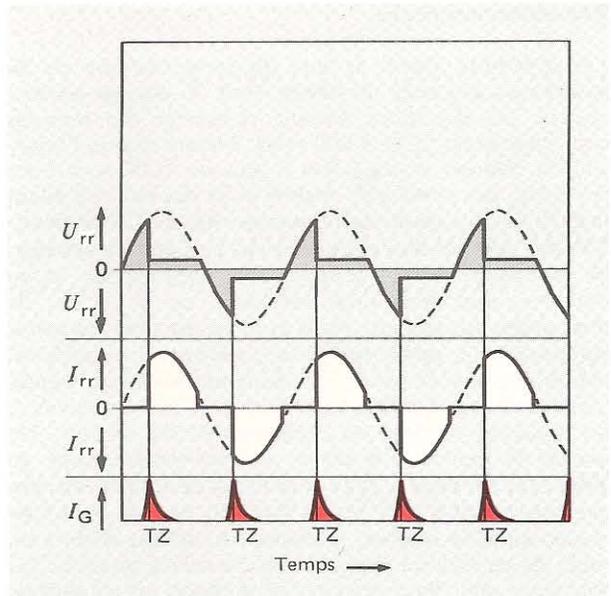


circuit de commande. Il existe toutefois un composant réunissant deux thyristors antiparallèles avec une connexion de gâchette commune (gG). La figure 86 représente la réunion progressive d'un thyristor commandé par une gâchette p et d'un thyristor commandé par une gâchette n. Un tel composant est appelé *triac*; sa courbe caractéristique directe (rouge) est totalement symétrique par rapport au point zéro intensité/tension. Le triac permet de contrôler le courant dans les *deux* sens. L'appellation "triac", qui peut paraître quelque peu bizarre, est une contraction des mots triode (éléments à trois électrodes) et "alternating current" (anglais = courant alternatif).

Fig. 84 Montage pour la régulation de la tension alternative et du courant alternatif
 I Avec un triac. Dans ce cas, on n'utilise pas de diodes.
 II Avec deux thyristors (Th_1, Th_2) et deux diodes (D_1, D_2).

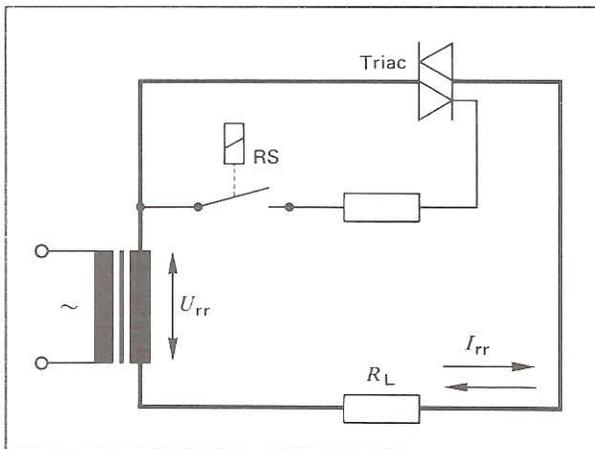
Fig. 85 Courbes de tension (U_{rr}) et d'intensité (I_{rr}) contrôlées dans les deux sens. La régulation est obtenue par deux thyristors ou mieux par un triac. Ces composants sont commandés par une impulsion de courant de gâchette (I_G).

Fig. 86 On peut considérer le triac comme deux thyristors montés antiparallèlement. La figure représente les schémas et symboles.

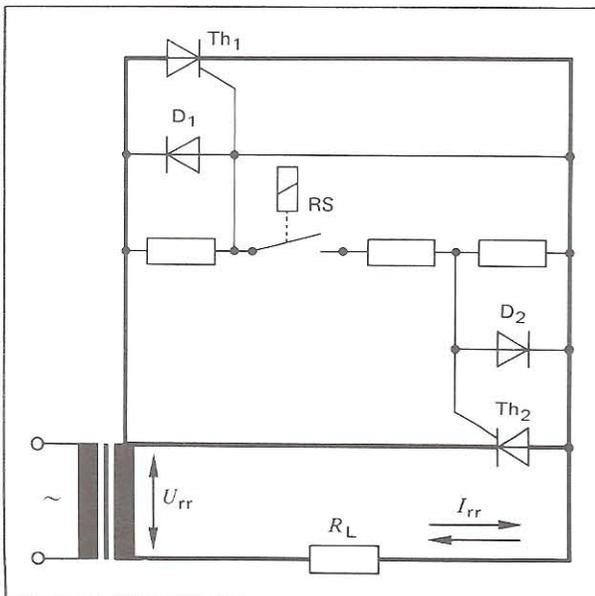


85

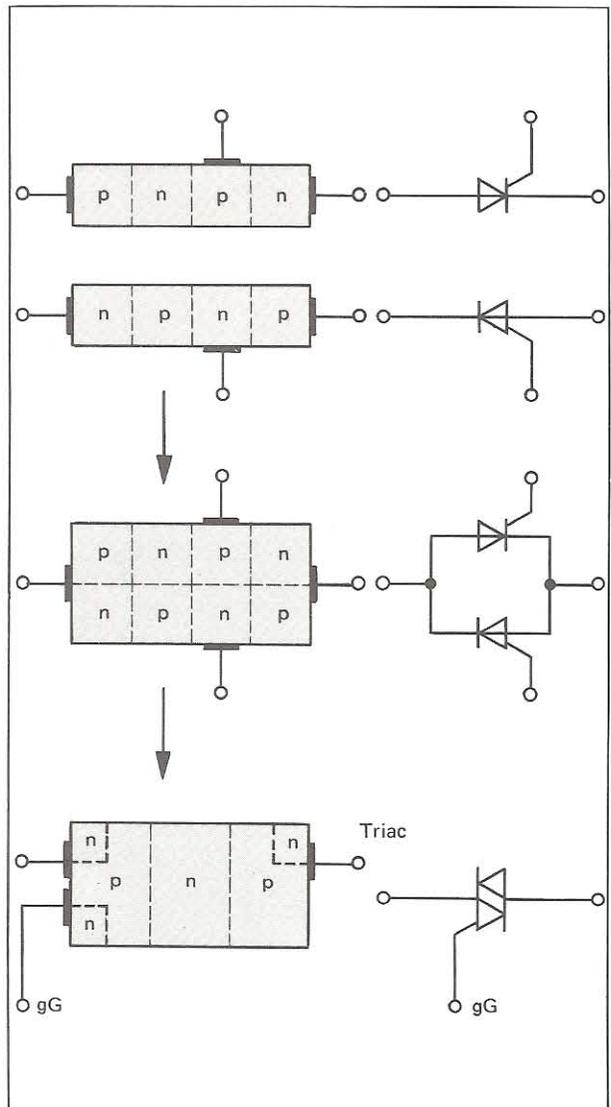
84



II



86



Réalisation technique

Les thyristors jouent le rôle de commutateurs ou de redresseurs à grande puissance. Lors du blocage en sens inverse, les thyristors doivent supporter des tensions comprises entre 50 et 4 500 volts. En sens direct, l'intensité du courant va de 0,5 A à plus de 1000 A, suivant les types. Les triacs sont établis pour des tensions allant jusqu'à 1200 volts et pour des intensités de 120 ampères. Comme pour les diodes de redressement et les transistors de puissance, il faut prévoir, à la construction et au montage, une évacuation suffisante de la chaleur de dissipation du courant. Ainsi qu'il en est pour les autres composants à semiconducteurs, l'élément fonctionnel même des thyristors est de dimensions réduites comparativement aux pièces de montage et aux connexions. Le matériau de base est généralement du *silicium*. Un disque de monocristal pnpn, alternativement dopé en impuretés de type p et en impuretés de type n, est fixé par son anode p (A) sur le fond du boîtier massif en métal; du côté opposé, la cathode n (K) est reliée à un câble de connexion épais, en fils de cuivre torsadés. Un deuxième câble de connexion, plus mince, est conduit de la région de gâchette à l'extérieur. Pour la bonne dissipation de la chaleur, le fond du boîtier est vissé sur une surface de refroidissement. Il faut veiller à ce que l'anode soit à la masse, dans le cas où la surface de refroidissement constitue elle-même une masse ou est reliée à la masse. Sur les véhicules automobiles, il est habituel que le pôle négatif du réseau électrique de bord soit relié à la masse. Dans ce cas, le thyristor doit être monté isolé; sinon, il serait détruit électriquement.

Résumé

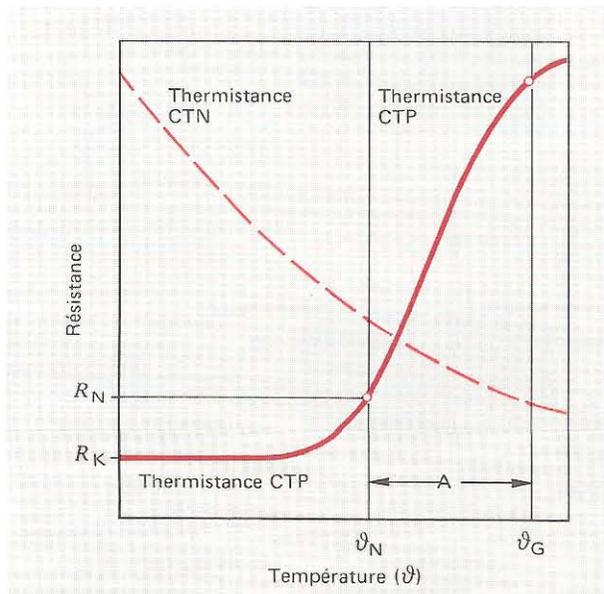
- Le thyristor comprend, en règle générale, quatre régions de semiconducteurs pnpn. Trois régions ont une connexion extérieure:
anode (A)
cathode (K)
gâchette (G)

- Le thyristor est un commutateur contrôlable possédant des propriétés de redressement. On le commande par la gâchette dans le sens direct. En sens inverse, la commande est inopérante.
- Une impulsion de courant amorce le thyristor. Celui-ci ne bloque à nouveau que lorsque le courant de charge est ramené à une valeur déterminée correspondant au courant d'arrêt. Le courant d'arrêt est d'intensité différente pour chaque type de thyristor.
- Sans liaison de gâchette, le thyristor est assimilable à une diode à quatre couches qui laisse passer le courant en sens direct, mais seulement lorsque la tension est assez élevée pour que le claquage électrique déclenche la conduction.
- Le triac est un élément à semiconducteurs à propriété de redressement dont la commande dans les deux sens ne requiert qu'une seule gâchette.
- Les thyristors de puissance de modèle courant ont des tensions de blocage de plusieurs milliers de volts et certains d'entre eux peuvent supporter en permanence un courant dépassant largement 100 ampères.

Résistances à semiconducteurs

On exige des résistances utilisées comme composants électroniques les qualités les plus diverses. Dans certains cas, elles doivent être dans une très large mesure indépendantes de la température, de la tension et de divers autres facteurs d'exploitation. Dans d'autres cas, elles doivent au contraire dépendre aussi étroitement que possible d'une de ces valeurs. Il est donc nécessaire de disposer d'un choix de résistances qui, par leur matériau et leur structure, permettent de faire face à de multiples cas d'utilisation. En électronique, les résistances qui dépendent étroitement d'une valeur de service sont

87



46

88

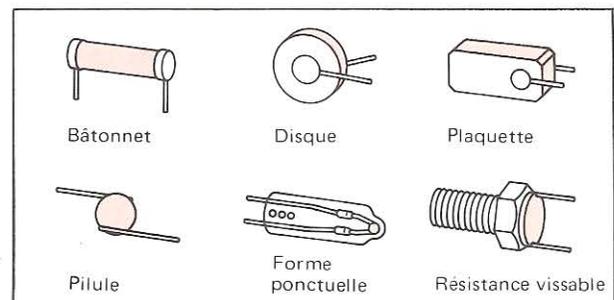


Fig. 88 Diverses formes de résistances CTN

Fig. 87 Valeur ohmique d'une thermistance CTP en fonction de la température. Par comparaison, thermistance CTN.

- A = gamme des températures de service de la thermistance CTP
- R_K = résistance de la thermistance CTP
- R_N = résistance nominale
- ϑ_G = limite supérieure de température
- ϑ_N = température nominale

d'une importance particulière; elles sont généralement constituées de matériaux semiconducteurs.

Thermistors

Les thermistors sont des résistances à semiconducteurs dont la valeur ohmique varie fortement avec la température. C'est pourquoi ils conviennent pour la mesure des températures ainsi que pour la régulation et la commande automatiques. Le comportement en service d'un thermistor dépend essentiellement de la manière dont il est échauffé, soit par le courant qui le traverse, soit par la température ambiante. Dans le premier cas, on parle d'*échauffement direct*, dans l'autre cas d'*échauffement indirect*. Les thermistors se subdivisent en deux groupes: thermistances CTP et thermistances CTN.

Thermistances CTP

A froid, elles conduisent mieux le courant électrique qu'à chaud. Ceci est également valable pour les métaux, comme nous l'avons vu au début. Toutefois, lorsque la température s'élève, la résistance des thermistances CTP augmente si faiblement que nous pouvons la considérer comme constante dans les limites d'une certaine gamme de température. A ce propos, les résistances métalliques ne présentent pas d'intérêt. A basse température, les thermistances CTP usuelles se comportent, en fait, comme les métaux, mais à partir d'une température déterminée (ϑ_N , lire "théta") leur valeur ohmique s'élève brusquement lorsque la température continue de croître, phénomène qui est représenté par la portion de courbe à forte pente, entre ϑ_N et ϑ_G . Le pourcentage de la variation de résistance par degré de température représente le coefficient de température. Les thermistances dont la valeur ohmique croît avec la température ont donc un coefficient de température positif: on les appelle "thermistances CTP". Les thermistances CTP ont un coefficient de température allant de 6 à 60 %/degré, ceci n'étant toutefois valable que dans une gamme de température relativement étroite.

Les résistances CTP à échauffement indirect servent principalement à la mesure des températures. Le plus souvent, on utilise comme instrument indicateur un ohmmètre gradué en degrés Celsius au lieu d'être gradué en ohms. Le courant de mesure est si faible qu'il ne peut échauffer la résistance CTP; un échauffement direct supplémentaire même faible entraînerait des erreurs de mesure considérables. La résistance CTP à échauffement direct est parcourue par un fort courant — le courant de charge — qui l'échauffe plus ou moins, suivant l'intensité, et provoque de ce fait des modifications de la résistance. Les résistances CTP à échauffement direct sont utilisées, par exemple, comme limiteurs de courant et interrupteurs temporisés.

Les thermistances CTP sont constituées d'un matériau céramique et de titanate de baryum fritté, avec additifs d'oxydes et de sels métalliques. Avec de tels additifs, on peut faire varier les propriétés de la thermistance à l'intérieur de limites très étendues dans le but de l'adapter aux exigences particulières du montage électronique auquel elle est destinée. Le corps fritté a, la plupart du temps, la forme d'un disque et il est livré avec ou sans trou de fixation. Les fils de connexion sont raccordés à la céramique au moyen d'une soudure spéciale et la céramique elle-même est recouverte d'un vernis de protection.

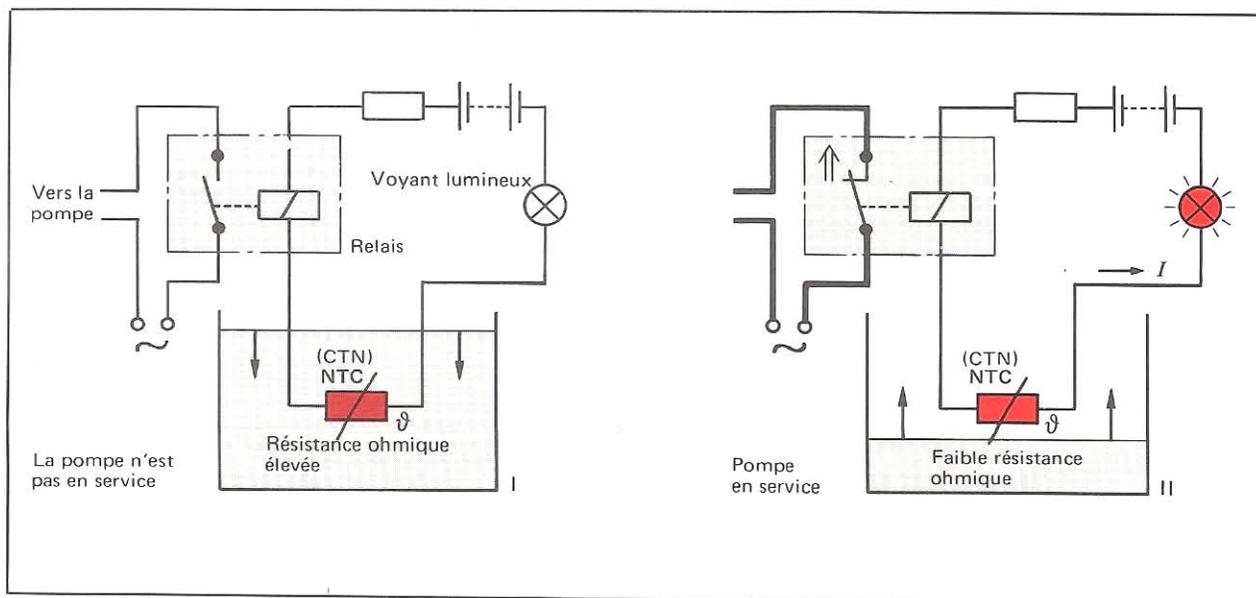
Thermistances CTN

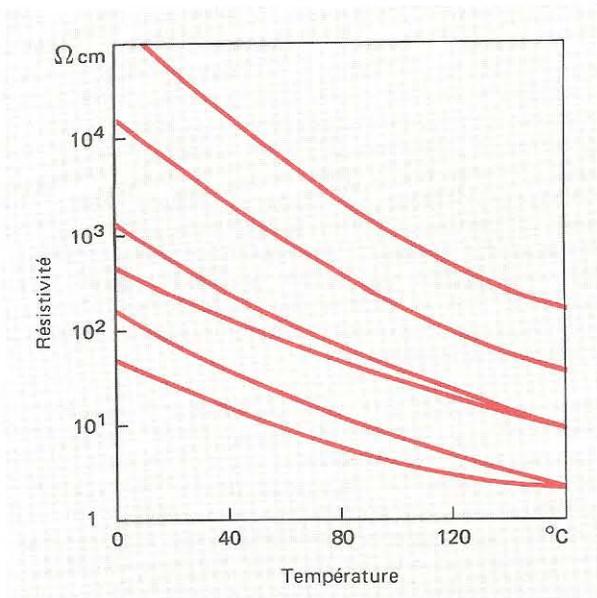
A l'état chaud, elles conduisent mieux le courant électrique qu'à l'état froid, ce qui est une propriété normale pour les semiconducteurs (génération de paires). Ces thermistances ont par conséquent des courbes de résistance tombant vers la droite, ce qui exprime que leur valeur ohmique diminue lorsque la température croît: le coefficient de température est *négatif*. C'est d'ailleurs pourquoi on les appelle "thermistances CTN" (Coefficient de Température Négatif). Les thermistances CTN ont un coefficient de température compris entre -2 à -60 %/degré.

Fig. 89 Exemple d'un système d'indication et de régulation du niveau d'un liquide.

I La résistance CTN est maintenue à l'état froid par le liquide et sa valeur ohmique est par conséquent élevée. Il ne circule qu'un très faible courant dans le circuit de régulation; le voyant lumineux ne s'allume pas et le relais n'est pas excité.

II Aussitôt que le niveau du liquide descend au-dessous de la résistance CTN, l'intensité I s'élève par suite de l'échauffement progressif de cette résistance jusqu'à ce que le voyant s'allume et que le relais soit excité. La pompe refoule du liquide jusqu'à ce que la résistance soit entièrement noyée et que le système revienne à l'état I.





90

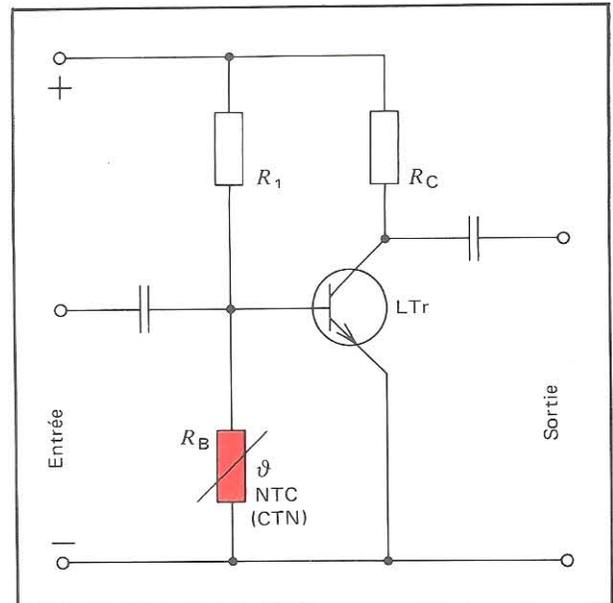
En ce qui concerne le comportement de la résistance CTN, son mode d'échauffement, soit par absorption de la température de son environnement, soit par le courant qui la traverse, est également d'une importance décisive. La résistance CTN à échauffement indirect convient pour la mesure et la régulation de la température. La thermistance CTN utilisée dans ce cas est de petite taille, afin que les brusques variations de température de son environnement l'affectent aussi rapidement que possible. La compensation de température dans les montages électroniques amplificateurs est un domaine d'application très important (thermistances de compensation). Entre autres utilisations, les thermistances CTN à échauffement direct servent à l'indication du niveau des liquides. On utilise en outre de petites thermistances CTN enrobées de verre dans les têtes de mesure des hygromètres et des appareils de mesure de la pression des gaz raréfiés (vide), etc. On les rencontre donc partout où la température et la conduction de la chaleur jouent un rôle (figure 89).

Les thermistances CTN sont constituées de mélanges pulvérulents agglomérés, à base d'oxydes métalliques — de fer principalement — additionnés de sels métalliques, tels que titanate de zinc et chromate de magnésium. Le mélange pulvérulent est fritté à haute température au moyen d'un liant plastique. La très grande variété des combinaisons possibles de matériaux ouvre aux résistances CTN de très nombreuses possibilités d'utilisation en électronique. Le diagramme vous montre très clairement les très larges limites entre lesquelles peut varier la résistivité des masses frittées. Le procédé de frittage a lui-même une influence sur le comportement de la thermistance à la température. La taille, la forme et le revêtement des corps frittés dépendent du domaine d'utilisation de ces importants composants semiconducteurs.

Le varistor

Comme le montre la droite noire du diagramme, la résistance des métaux n'est pas directement influencée

48



91

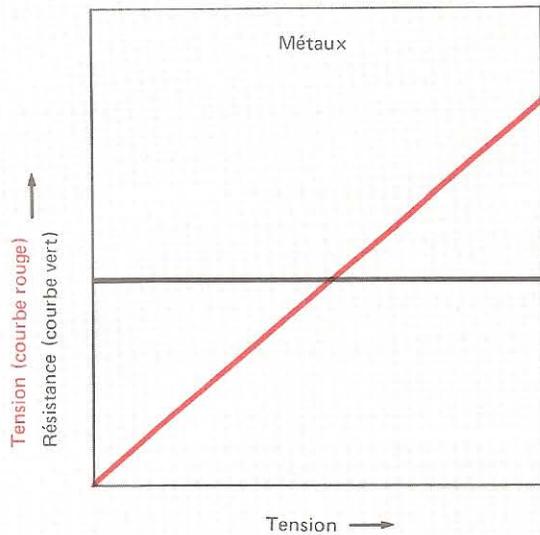
par les tensions qu'on leur applique. Vous constaterez ce comportement expérimental au simple fait que l'intensité du courant varie proportionnellement à la tension (droite rouge). Toutefois, il existe en électronique un composant à semiconducteurs dont la résistance dépend étroitement de la tension appliquée. Ce composant est appelé "varistor" ou encore "résistance VDR" (Voltage Dependent Resistor). Aux basses tensions, le varistor a une résistance ohmique élevée, mais il perd d'autant plus rapidement sa résistance que la tension s'élève. En conséquence, l'intensité du courant ne s'élève d'abord que lentement, puis de plus en plus rapidement. La courbe de la figure 94 représente la caractéristique VDR, laquelle a une certaine parenté avec les courbes caractéristiques de diodes, et cela n'est pas sans raison.

Le varistor est constitué de grains extrêmement petits de carbure de silicium, agglomérés au moyen d'un liant en une masse frittée très dure. Il existe des jonctions pn là où les grains sont par hasard en contact. Le corps fritté constitue ainsi un réseau statistique de diodes microscopiques associées entre elles parallèlement, antiparallèlement ou en série. Aux petites tensions, le raccordement en série, qui bloque dans les deux sens, prédomine. Lorsque la tension s'élève, le nombre, faible au départ, de claquages dans les diodes en série augmente. Les diodes en parallèle du réseau fritté deviennent plus efficaces: le courant augmente. Si l'on inverse la polarité aux bornes du varistor, la relation courant-tension demeure inchangée et par conséquent la même courbe caractéristique demeure valable. Car, d'après la loi du hasard, il existe statistiquement autant de microdiodes associées antiparallèlement que parallèlement dans la résistance VDR.

Les résistances VDR sont souvent en forme de disque. Les deux faces planes du disque portent chacune, pour assurer le contact, une mince couche de métal et un fil de connexion. Les disques VDR avec trou de fixation peuvent être facilement empilés en série, les couches métalliques établissant le contact mutuel. Entre autres utilisations, on se sert des résistances VDR pour l'extinction des étincelles, pour la stabilisation des tensions ainsi que pour la protection contre les surtensions.

Fig. 90 Courbes caractéristiques de température de la résistivité de divers matériaux CTN.

Fig. 91 Nous voudrions vous donner ici un exemple de fonctionnement de la compensation CTN dans le cas d'un étage d'amplification par transistor, montage en émetteur commun. Cela peut concerner un étage final d'amplification dont le rôle est d'amplifier *en puissance* le signal électrique. En raison de sa puissance de dissipation $P_V = U_{EC} \cdot I_C$, le transistor de puissance qu'on utilise alors consomme environ 10 watts ou davantage, ce qui l'échauffe considérablement. Comme le transistor est un composant à semiconducteurs, il a une propriété CTN et sa conductivité augmente; le courant de collecteur (I_C) et le courant de base (I_B) croissent, ce qui entraîne une nouvelle augmentation de l'amplification et de la puissance dissipée. Le transistor n'amplifie plus sans distorsion. La température peut s'élever alors au point de provoquer la destruction du transistor. Le problème consiste à empêcher l'accroissement de I_C en réduisant la tension de polarisation (U_O) entre émetteur et base. Ce rôle est rempli par la résistance CTN montée comme résistance R_B dans le diviseur de tension, ainsi que le montre la figure 66. Vous trouverez toujours cette résistance CTN dans le voisinage immédiat du transistor de puissance. De cette façon on est assuré que les deux composants sont toujours à la même température. Lorsque celle-ci s'élève, la résistance R_B diminue; la chute de tension, qui représente la polarisation $U_O = I_B \cdot R_B$, diminue effectivement et I_C ne varie pas, à la condition toutefois que la résistance CTN possède un coefficient de température adapté au rôle compensateur qui lui est attribué.



92

93

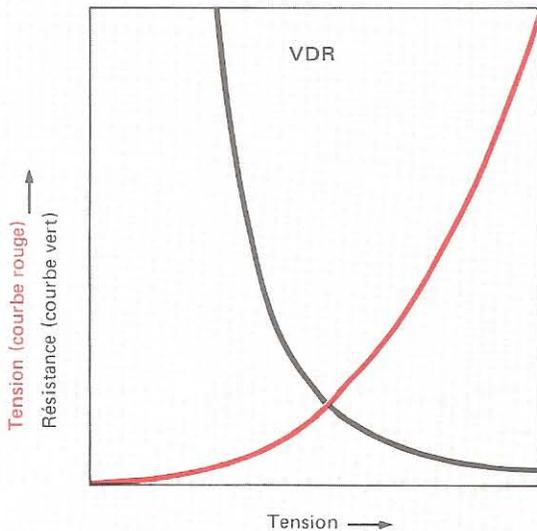
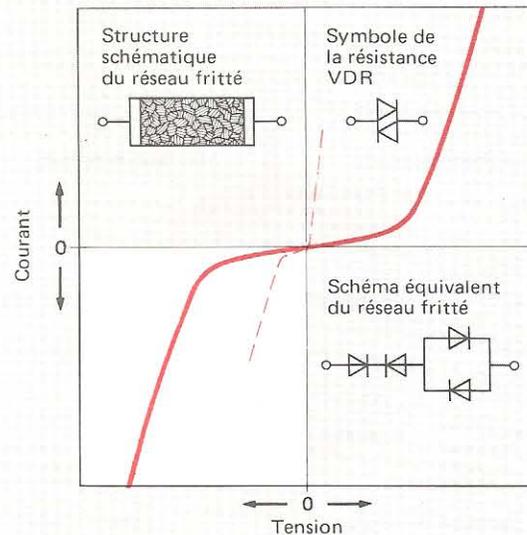


Fig. 92 La résistance des métaux ne dépend pas de la tension qui leur est appliquée. Toutefois, aux fortes intensités, une dépendance se manifeste du fait que l'échauffement direct du conducteur métallique entraîne une élévation de la résistance.

Fig. 93 La résistance des varistors dépend énormément de la tension appliquée, ce que l'on peut très facilement constater à la courbure de la courbe caractéristique. Lorsque la tension croît, la résistance VDR devient de plus en plus conductrice. L'intensité monte très rapidement, comme on pouvait s'y attendre d'après l'expression de la loi d'Ohm $I = U/R$.

Fig. 94 La résistance VDR peut être considérée comme un réseau de diodes microscopiques incluses dans le corps fritté.
a) Caractéristique courant-tension pour les deux sens du courant et de la tension.
b) Moyen de comparaison: caractéristique d'une diode unique.



94

95

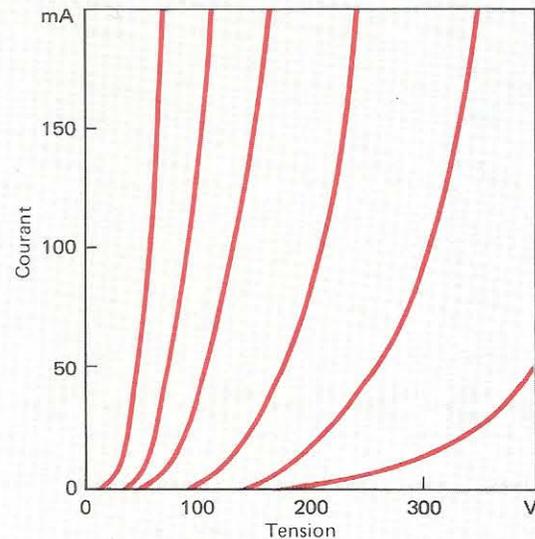


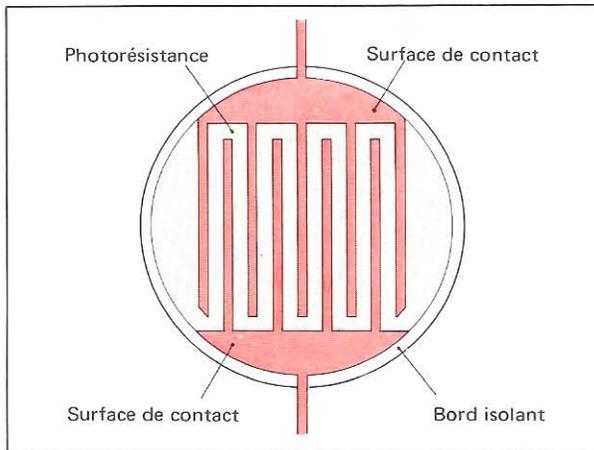
Fig. 95 Les caractéristiques VDR peuvent être très différentes suivant la nature, la forme et la taille du corps fritté.

Photorésistance

La photorésistance est un semiconducteur dont la conductivité est d'autant meilleure qu'on le soumet à un éclairage plus intense; dans l'obscurité, elle a en règle générale une forte résistance ohmique. C'est pourquoi on la dénomme "résistance LDR" (Light Dependent Resistor). Sa sensibilité à la lumière provient du fait qu'en atteignant les atomes semiconducteurs la lumière libère les électrons de valence de leur liaison. Il y a génération de paires électron-trou, ce qui améliore considérablement la conductivité. Lorsqu'on soumet la photorésistance éclairée à une tension, un courant s'établit. L'intensité de ce courant, dit "de luminosité", dépend principalement des facteurs suivants: intensité de l'éclairage, longueur d'onde de la lumière et température. Comme le montre la figure 97, l'intensité de l'éclairage a une influence extrêmement forte sur la photorésistance. L'unité d'intensité d'éclairage est le *lux*, avec lequel on mesure la luminosité des surfaces éclairées. Afin que vous puissiez vous représenter l'importance des différences de luminosité perçues par l'œil humain, nous citerons les chiffres suivants:

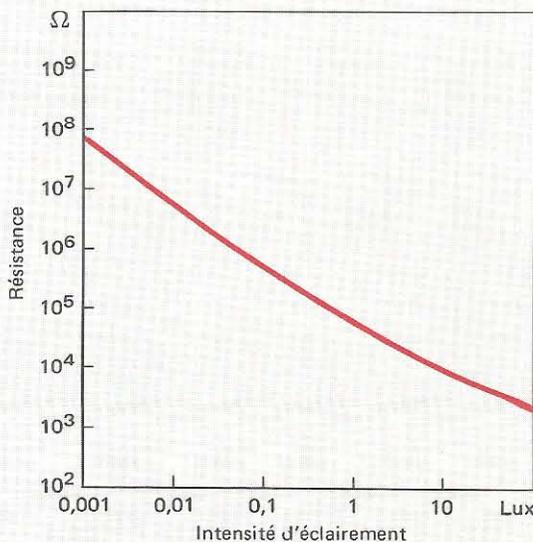
Intensité d'éclairage (lux)	Conditions d'éclairage
0,000 ...	Obscurité profonde
0,001	Seuil de sensibilité de l'œil humain. Ciel nocturne, sans nuages et sans lune.
0,01	Clair de lune.
10	Eclairage de rue.
100	Clarté moyenne dans une pièce durant le jour.
1 000	Limite supérieure d'éclairage artificiel.
30 000 à 50 000	Lumière du jour, le ciel étant légèrement voilé.

La photorésistance peut être assimilée à un œil électronique en ce sens qu'elle est sensible à la lumière et y réagit comme l'œil humain. Mais il existe aussi des "yeux électroniques" qui sont également sensibles à des rayons lumineux invisibles, c'est-à-dire aux rayons

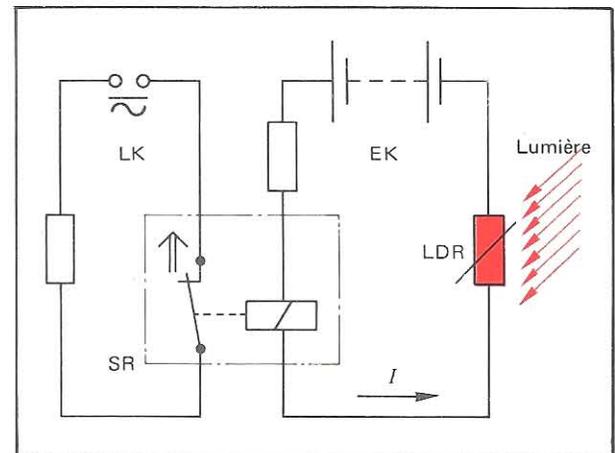


96

97

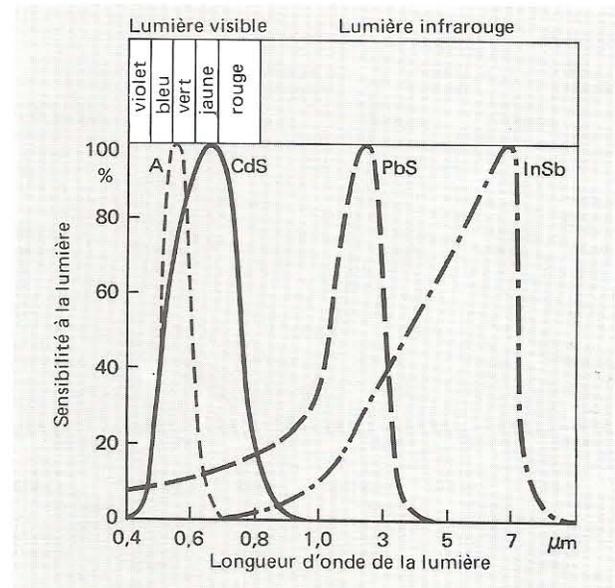


50



98

99



infrarouges. Ceux-ci ne diffèrent de la lumière visible que par leur longueur d'onde un peu plus grande. Suivant le matériau dont il est construit, l'œil électronique réagit mieux à la lumière visible qu'aux rayons infrarouges ou inversement. Les résistances au sulfure de cadmium (CdS) ont par exemple leur maximum de sensibilité dans la gamme de longueurs d'onde de la lumière visible. On les utilise comme détecteurs de flamme dans les installations d'alarme, dans les brûleurs à mazout, etc. et aussi, de plus en plus, comme interrupteurs crépusculaires pour l'éclairage des parcs par exemple. Les résistances sensibles aux rayons infrarouges sont constituées de sulfure de plomb (PbS) ou antimoniure d'indium (InSb) et sont spécialement utilisées contre les hôtes indésirables, leur rôle consistant à dresser une barrière lumineuse invisible que les voleurs et cambrioleurs ne peuvent franchir sans déclencher un système d'alarme.

Photodiode et élément photoélectrique

La photodiode est une diode à semiconducteurs qu'on fait fonctionner en sens inverse et dont la jonction pn est soumise aux rayons lumineux. Toute jonction pn est sensible à la lumière. Jusqu'à maintenant nous ne vous avons pas parlé de cette importante particularité tout simplement parce que la jonction pn des diodes normales de commutation, de limitation et de redressement est parfaitement protégée contre le rayonnement de la lumière. Vous vous souvenez peut-être de ce que nous avons dit à propos de l'effet de soupape de la diode? Dans la diode, le courant inverse dû à la conduction intrinsèque est bien sûr très faible, mais malgré tout indésirable.

Par contre, dans la photodiode, on utilise techniquement ce courant inverse: les rayons lumineux pénètrent

presque librement dans la couche d'arrêt de forte résistance ohmique, détachent les électrons de valence de leur liaison dans le cristal et créent de cette manière des trous et des électrons de conduction. Sous l'influence de la tension inverse, les trous se déplacent de la couche d'arrêt vers le pôle négatif en passant par le semiconducteur de type p et les électrons vers le pôle positif en empruntant le semiconducteur de type n. Un courant de luminosité s'établit dont l'intensité est fonction de l'intensité d'éclairement et de la longueur d'onde de la lumière. La photodiode s'échauffe plus ou moins sous l'action de ce courant, suivant l'intensité d'éclairement. Ceci concerne particulièrement les photodiodes au germanium dont la température maximum de fonctionnement est inférieure à celle des photodiodes au silicium. Lorsque vous voyez une barrière à lumière rouge aux portes à ouverture et fermeture automatiques d'un ascenseur, ce sont ordinairement des photodiodes au silicium qui sont montées en "garde-barrière", car le maximum de sensibilité du silicium pn se produit à la lumière rouge de longueur d'onde 0,8 μ .

Pour terminer, nous dirons quelques mots des éléments photoélectriques. L'élément photoélectrique est une source de courant aux pôles de laquelle apparaît une

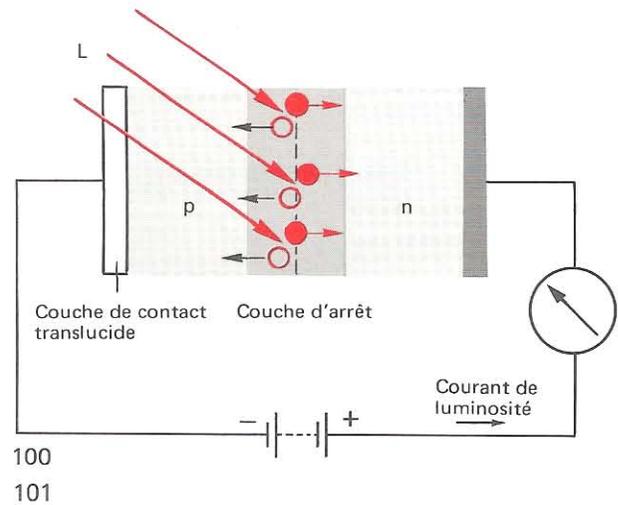


Fig. 96 Exemple de réalisation d'une photorésistance. Le trajet en forme de méandre du semiconducteur a une résistance ohmique relativement faible.

Fig. 97 Exemple des variations de la valeur ohmique d'une photorésistance en fonction de l'intensité d'éclairement.

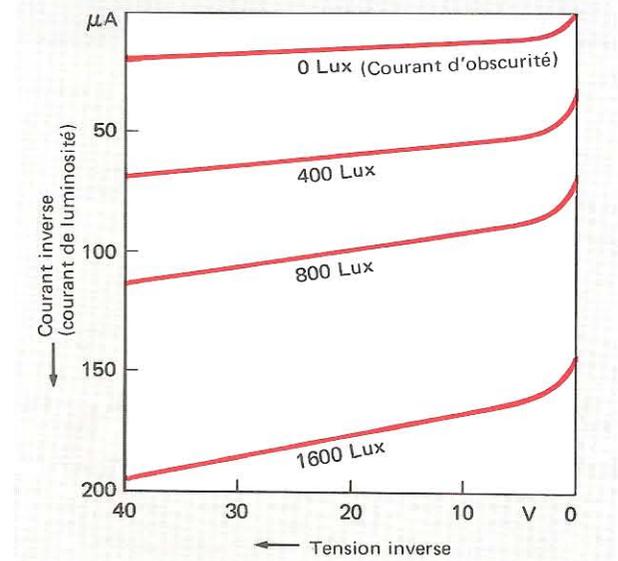
Fig. 98 On utilise souvent une photorésistance comme interrupteur clair-sombre dans le circuit d'excitation EK d'un relais SR (relais de fermeture). Sous l'influence de l'éclairement, le relais ferme le circuit de charge (LK).

Fig. 99 Sensibilité à la lumière de divers matériaux LDR, à la température ambiante, en fonction de la longueur d'onde de la lumière.

CdS = sulfure de cadmium
 PbS = sulfure de plomb
 InSb = antimoniure d'indium
 A = sensibilité de l'œil humain comme élément de comparaison

Fig. 100 Fonctionnement de la photodiode sous un rayonnement (L).

Fig. 101 Courbes caractéristiques d'une photodiode.



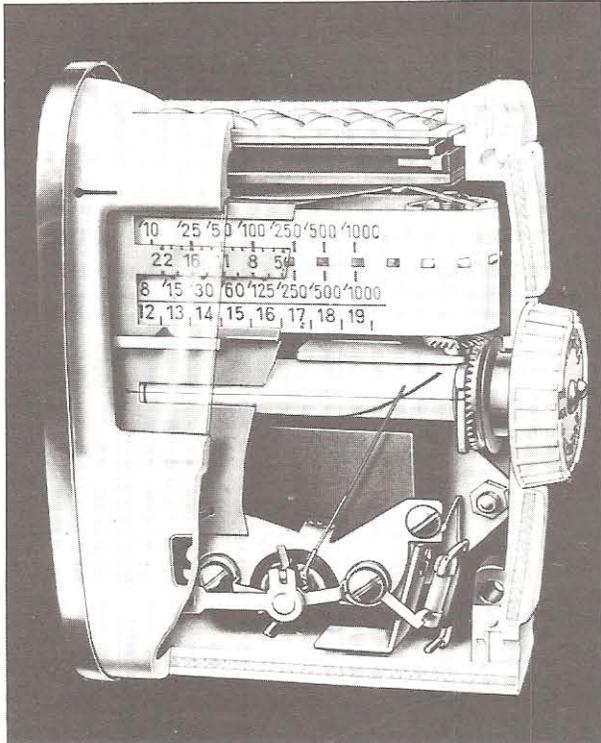
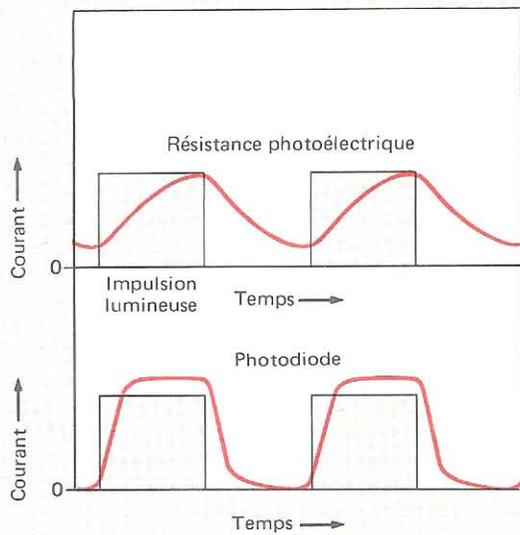
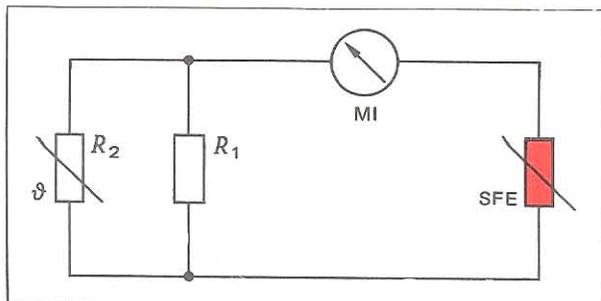


Fig. 103 Vue en coupe du photomètre "Sixtomat"

Fig. 104 Schéma de principe du photomètre "Sixtomat"
 MI = instrument de mesure du courant photoélectrique
 SFE = élément photoélectrique au sélénium
 R_1 = résistance d'adaptation ($6\text{ k}\Omega$)
 R_2 = thermistor ($10\text{ k}\Omega$ à 20°C)

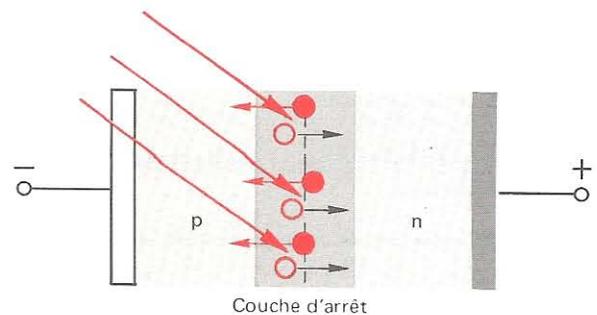


tension lorsqu'on le soumet à un flux lumineux. A partir de toute diode photoélectrique, un simple montage approprié permet de réaliser un élément photoélectrique. Il suffit pour cela d'enlever la source de la photodiode et de relier la région p à la région n par l'intermédiaire d'un appareil de mesure de courant photoélectrique suffisamment sensible ou par un amplificateur. En l'absence de flux lumineux, aucun courant ne circule dans le circuit de mesure. Mais aussitôt que les rayons lumineux atteignent la couche d'arrêt, celle-ci devient conductrice par suite de la génération de paires: les trous se précipitent dans la région n et se dirigent vers le pôle positif, les électrons de valence libérés se précipitent dans la région p et se dirigent vers le pôle négatif. Le circuit de courant étant fermé, un courant photoélectrique s'établit. Les éléments photoélectriques de modèle courant sont fabriqués à partir de germanium, de sélénium ou de silicium. De même que nous l'avons vu pour la photodiode, la couche d'arrêt des photoéléments est attaquée par les rayons lumineux à travers une couche de contact translucide, oxyde de cadmium par exemple.

On confond souvent l'élément photoélectrique avec la cellule photoélectrique. Les cellules photoélectriques sont des tubes à vide, ou des tubes en verre remplis de gaz, dont la cathode plate porte une couche sensible à la lumière. Lorsqu'on soumet cette couche à un flux lumineux, des électrons sont libérés et la cellule devient conductrice. Les multiplicateurs photoélectriques et les tubes convertisseurs d'image sont des cellules photoélectriques spéciales à très haute sensibilité à la lumière et à temps de réponse très court.

Fig. 102 On se demandera, avec juste raison, pourquoi toute cette complication apportée par les photodiodes alors que les photorésistances, de structure beaucoup moins compliquée, permettent d'obtenir le même résultat. A cela nous répondrons que les photodiodes sont utilisées toutes les fois qu'il s'agit d'exploiter avec précision de très rapides variations de la luminosité. Par contre, des secondes peuvent s'écouler avant que la résistance photoélectrique ne réagisse à l'action de la lumière brusquement allumée. Inversement, après extinction de la source lumineuse, la disparition du courant ne se produit que beaucoup trop lentement. Voici l'exemple de détection clair-sombre dans un système à calculer digital. Les impulsions lumineuses rectangulaires (grises) doivent être converties, aussi fidèlement que possible quant à la forme, en impulsions de courant (rouges). Dans le cas d'une série d'impulsions rapides et de courte durée, cela n'est pas possible avec des résistances photoélectriques. Par contre, les photodiodes détectent parfaitement des fréquences d'impulsions lumineuses allant jusqu'à 100 kHz. Les fiancs du courant ne sont certes pas verticaux comme ils devraient l'être dans le cas d'une rapidité de réponse absolue, mais leur pente est toutefois suffisante pour que l'information digitale codée subsiste. Nous verrons, page 57, ce qu'il faut entendre par "digital".

Fig. 105 Production de la tension dans un élément photoélectrique par éclairage de la couche d'arrêt au moyen d'une source lumineuse L.



Désignation des types de composants à semiconducteurs

En Allemagne, les composants à semiconducteurs utilisés en "électronique de loisirs" (récepteurs radio, téléviseurs, magnétophones) sont désignés par une formule de type comportant 2 lettres et 3 chiffres. Quant à la formule de type des composants à semiconducteurs de l'électronique industrielle, elle comporte 3 lettres et 2 chiffres. Les diodes Z font exception à cette règle, des chiffres et des lettres s'ajoutant à la formule de type pour indiquer la tolérance et la valeur de la tension de limitation.

Dans les pays autres que l'Allemagne, les formules de type sont le plus souvent différentes. Les Américains, par exemple, ont certains types caractérisés par la lettre N (= semiconducteur à 1 couche d'arrêt), 2N (= semiconducteur à 2 couches d'arrêt), etc.

Voici deux exemples de formules de types utilisées en électronique automobile:

AC 151 = transistor BF (pnp) au germanium, comme commutateur "détresse" pour camions.

BU... = transistor de commutation de puissance (npn) au silicium, pour équipement d'allumage par batterie (TSZ).

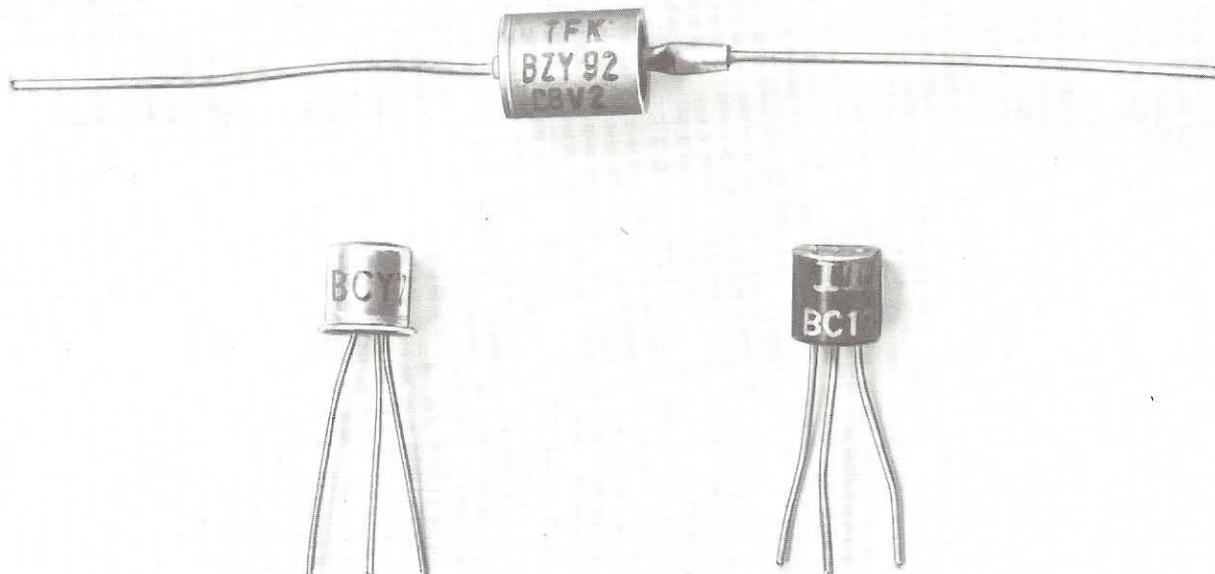
Voir d'autres exemples, figure 106.

Première lettre	Deuxième lettre	Troisième lettre
Matériau semiconducteur	Utilisation	
A Germanium	A Diode	Z } Y } correspondent à des types de l'élec- X } tronique industrielle
B Silicium	C Transistor BF ¹⁾	
	D Transistor de puissance BF ¹⁾	
	F Transistor HF ²⁾	
	P Composant sensible au rayonnement lumineux (par ex. éléments photoélectriques)	
	R Thyristor	
	S Transistor de commutation	
	T Thyristor de puissance	
	U Transistor de commutation de puissance	Les chiffres qui suivent la troisième lettre sont des numéros de fabrication
	Y Diode de puissance	
	Z Diode de Zener (diode limitatrice)	

¹⁾ NF = basse fréquence

²⁾ HF = haute fréquence

Fig. 106 Une diode et deux transistors avec leur formule de type.



Circuits intégrés

Le circuit intégré est un ensemble de nombreux composants miniatures tels que condensateurs, résistances, diodes et transistors réunis pour constituer une unité de montage électronique. L'intérêt qu'il présente est au premier chef l'économie réalisée dans la construction et dans l'utilisation de l'espace (encombrement très réduit). Les chapitres précédents ont clairement montré que les *composants monolithiques*, c'est-à-dire composants créés à partir de monocristaux semiconducteurs dopés, se prêtaient admirablement à la miniaturisation de montages entiers. C'est pourquoi les circuits intégrés sont actuellement presque toujours constitués d'éléments monolithiques. Toutefois, les bobines servant à la concentration ou au renforcement de champs électromagnétiques ne peuvent pas être incluses dans les circuits intégrés monolithiques. Dans un certain sens, les circuits hybrides, dont nous parlerons très brièvement à la fin de ce chapitre, peuvent être considérés comme des circuits intégrés.

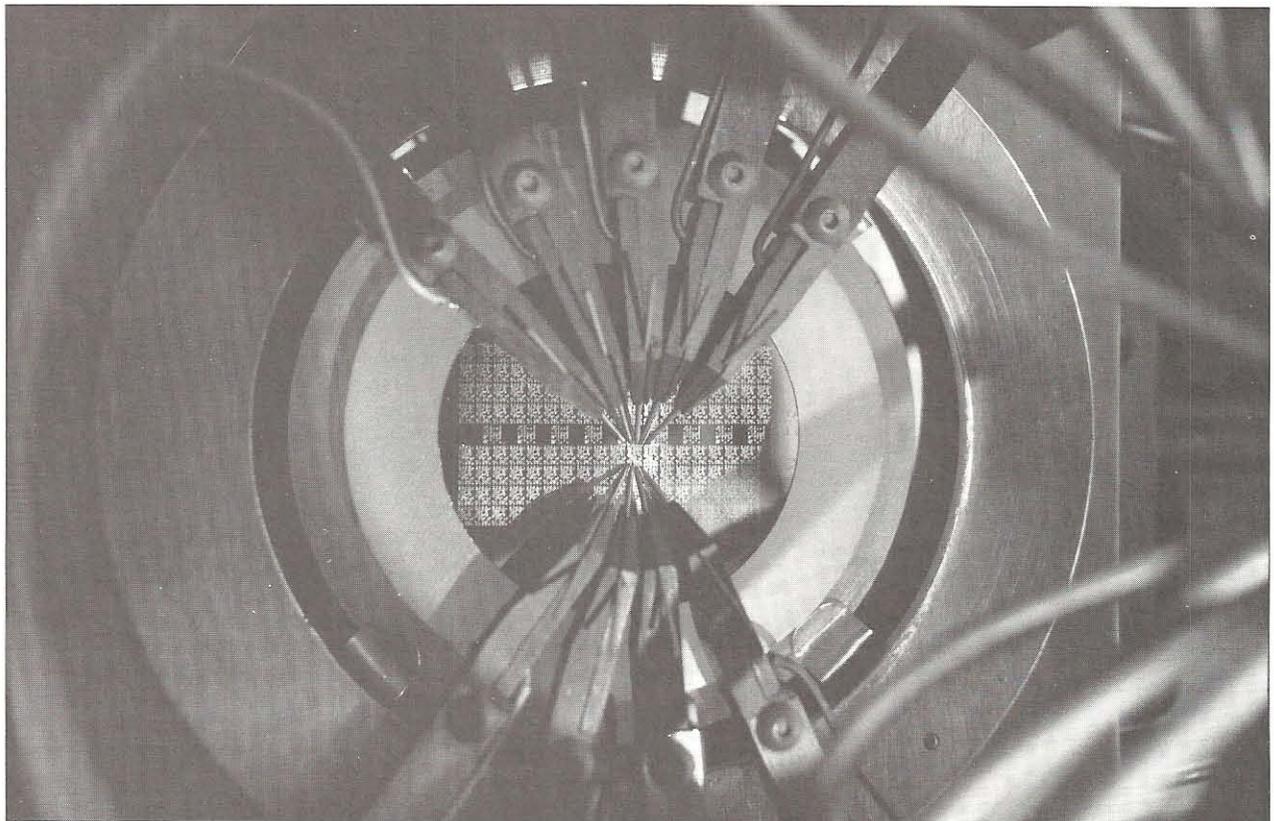
Le montage monolithique intégré est issu de la technique planar: les couches semiconductrices de types n et p sont disposées à plat les unes sur les autres ou les unes à côté des autres. Le bloc porteur est constitué d'un monocristal de silicium de type p.

Ce silicium p constitue le porteur de l'ensemble du circuit intégré, lequel est logé sur une surface de cristal d'un mm^2 seulement. Les composants qui n'ont pas à être reliés électriquement entre eux doivent naturellement être bien isolés l'un par rapport à l'autre, et cela est obtenu par le moyen d'une jonction pn raccordée en permanence dans le sens de blocage entre le bloc de base

de type p et tous les éléments du montage. Cette jonction générale pn constitue le premier degré de l'intégration. On entend, en effet, par intégration, la combinaison des éléments de montage en une seule unité. Pour arriver à ce but, on crée, suivant des procédés de fabrication appropriés, une couche épitaxiale de silicium semi-conducteur de type n sur le bloc de type p, ainsi que le montre schématiquement la figure 108. La structure en forme d'alvéoles de cette couche n est obtenue par laquage, masquage, exposition à la lumière et décapage à l'acide, c'est-à-dire suivant les étapes de fabrication que nous avons déjà vues à propos des transistors planar. Chaque alvéole n recueille un élément monolithique. Les liaisons conductrices de courant indésirables d'élément à élément sont éliminées du fait que le bloc commun p détermine, dans toutes les conditions de fonctionnement, le potentiel électrique minimum du circuit intégré. Ceci veut dire que l'effet permanent de blocage n'est obtenu que si le bloc est relié au pôle négatif du système d'alimentation, ce qui est le cas général. Les liaisons électriques entre éléments d'un seul et même circuit intégré sont réalisées par de très étroites et très minces couches d'aluminium vaporisées sous vide.

Avec une plaquette de cristal de silicium p de 0,2 mm d'épaisseur et 50 mm de diamètre, on peut obtenir jusqu'à 1000 circuits intégrés. Comme chaque circuit intégré comprend lui-même un certain nombre de composants associés, vous pouvez juger du degré de rendement attaché à la fabrication des circuits intégrés. Un circuit intégré, partie bloc de base comprise, représente un volume de $0,2 \text{ mm}^3$, c'est-à-dire la grosseur de la moitié d'une tête d'épingle. Cette minuscule "création" est appelée "chip", et cela indépendamment du fait que la plaquette de monocristal héberge un ou plusieurs éléments monolithiques. Sous le rapport de l'utilisation de l'espace, le chip monolithique

Fig. 107 Vue en cours d'essai automatique de chips intégrés sur une plaquette de silicium utilisés par Bosch en électronique automobile.



n'est surpassé que par les composants de la technique MOS assemblés en circuits superintégrés. A la place d'une couche d'arrêt pn, les éléments MOS possèdent une couche de quartz (SiO_2), très mince et dense, tenant lieu d'isolant.

Résistances intégrées

Un fragment de matériau semiconducteur se comporte déjà comme une résistance. En règle générale, pour la fabrication de résistances, on utilise une région de semiconducteur faiblement dopée, c'est-à-dire à forte résistance ohmique. La base p d'un transistor planar convient tout particulièrement, car elle a la plus haute résistivité de toutes les régions de semi-conducteurs du chip. De cette manière, on peut fabriquer économiquement des résistances de 100Ω à $50\,000 \Omega$. La tolérance des résistances obtenues suivant le procédé de fabrication chip est de $\pm 20\%$ environ; par contre, les différences maximum que peuvent présenter entre elles les résistances d'un même chip ne sont que de $\pm 5\%$. Pour les résistances au-dessous de 100Ω , la réalisation présente des difficultés. Toutefois, il est toujours possible de fabriquer des résistances jusqu'à la valeur minimum de 50Ω en utilisant, à la place de la base p, la région d'émetteur n fortement dopée, c'est-à-dire à faible résistance ohmique.

La disposition des résistances sur un alvéole n du chip entraîne le risque de liaisons conductrices de courant indésirables, modifiant souvent fondamentalement le comportement électrique du circuit intégré dont le bon fonctionnement est ainsi compromis. Si, par exemple, la région p de la résistance est positive par rapport à l'alvéole n qui l'entoure, le courant ne circule pas, à travers la résistance, entre connexions A_1 et A_2 , mais il se déplace vers l'alvéole n, en empruntant la voie que lui offre alors une diode conductrice (D_p) polarisée en sens direct. Pour éviter cet inconvénient, on donne à l'alvéole n le potentiel positif le plus élevé qui peut régner sur le chip; ainsi, quelles que soient les conditions et la durée de fonctionnement, la diode incriminée demeure constamment polarisée en sens inverse et la résistance conserve son efficacité.

Diodes et condensateurs intégrés

Il est connu que toute jonction pn est assimilable à une diode. Actuellement, on utilise presque toujours comme diodes intégrées la diode émetteur-base d'un transistor, la diode base-collecteur (K) étant court-circuitée. Les propriétés électriques de la diode intégrée sont très voisines de celles de la diode autonome.

Le condensateur intégré n'est rien d'autre qu'une diode fonctionnant constamment dans le sens inverse et dont la couche d'arrêt de la jonction pn présente une capacité de transition effective. Nous pouvons ici nous résumer brièvement et revoir ce qui a été dit à ce sujet à la page 29. Nous avons vu que la capacité de transition dépend de l'épaisseur de la couche d'arrêt et que cette épaisseur dépend elle-même de la tension inverse appliquée. Dans la plupart des cas, la capacité doit demeurer aussi constante que possible, et cette exigence suppose, d'après la figure 51, une tension inverse relativement élevée. Dans les circuits monolithiques intégrés, on utilise le plus souvent comme condensateur la diode émetteur-base d'un transistor. On peut fabriquer rationnellement des condensateurs intégrés d'une capacité allant jusqu'à 500 picofarads. Comme pour les résistances intégrées, la tolérance est d'environ $\pm 20\%$.

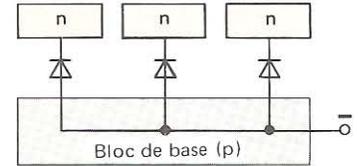
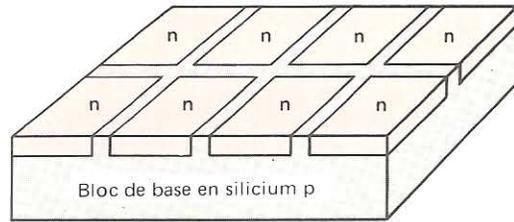


Fig. 108 Alvéole semiconducteur n d'une couche épitaxiale de silicium dans un bloc de base semiconducteur p en silicium
I Structure schématique

II Schéma équivalent montrant clairement l'effet de blocage de la jonction pn par rapport à l'alvéole lorsque le bloc de base est relié directement au pôle négatif de la source.

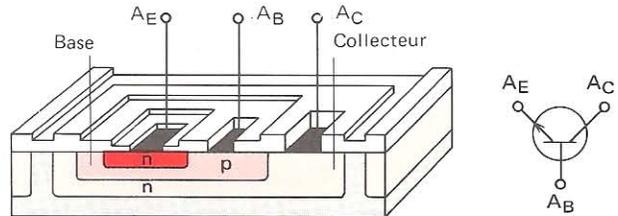


Fig. 109 Structure schématique du transistor npn intégré. Ce transistor a été créé suivant les étapes de fabrication montrées à la figure 72, avec la seule différence que le transistor *intégré* est porté par un bloc de base en silicium p.

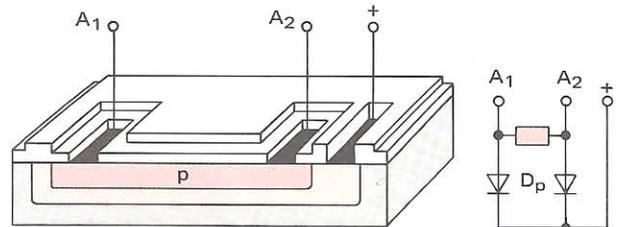


Fig. 110 Résistance intégrée. Structure schématique et schéma équivalent montrant comment la région p doit être, grâce à la jonction pn, isolée électriquement de la région n située au-dessous.

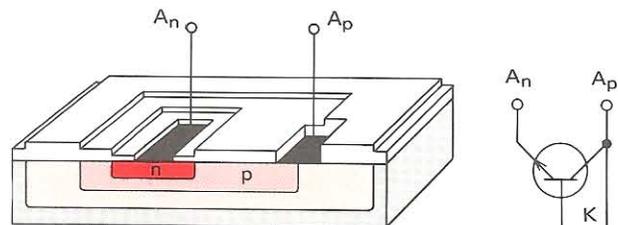
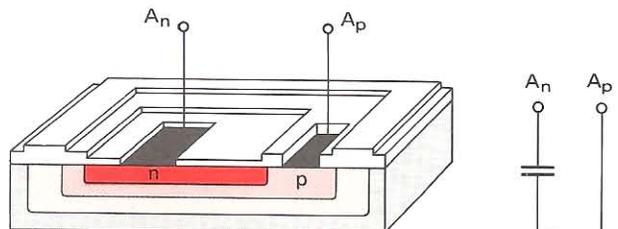


Fig. 111 Diode intégrée formée d'un transistor dont la jonction base-collecteur est court-circuitée (K).

Fig. 112 Condensateur intégré formé d'une diode fonctionnant exclusivement en sens inverse. La connexion A_n est reliée au positif, la connexion A_p au négatif, suivant figure 37 (II).



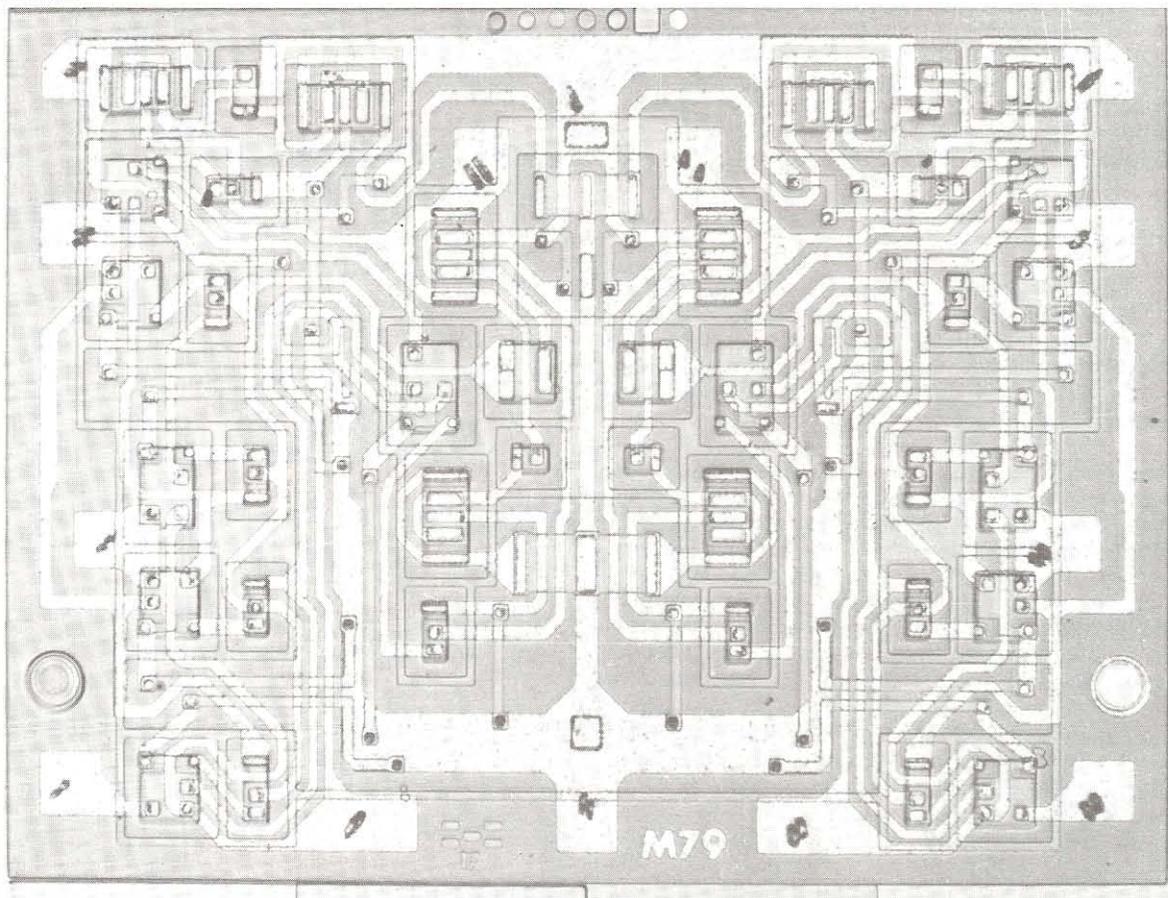
Surface requise par les circuits intégrés et coût de fabrication

Les résistances et condensateurs requièrent généralement une plus grande surface que les diodes et les transistors. La surface requise détermine en grande partie le coût de fabrication d'un chip. Par contre, le coût de fabrication d'une plaquette de silicium dopée et métallisée est constant, quel que soit le nombre de chips que contient la plaquette et le nombre d'éléments contenus dans un chip. Comme nous l'avons vu, il est facile d'obtenir

diodes et condensateurs à partir de transistors monolithiques. C'est une solution toute trouvée. En ce qui concerne les résistances, elle n'est pas applicable aussi simplement si l'on s'en rapporte au schéma structurel de la figure 110. Toutefois, ces dernières années, la fabrication pratique — sous l'impulsion d'une rationalisation intensive — s'oriente également vers l'obtention de résistances à partir de transistors planar. Cette méthode évite un dopage spécial, elle est plus économique et les résistances ainsi fabriquées ont un fonctionnement plus sûr. Le tableau suivant réunit les caractéristiques principales des composants intégrés.

Élément monolithique	Qualification	Caractéristiques	Valables pour
Transistors	Courant de collecteur (I_C)	10 mA à 1 A	
	Gain en courant (V_1)	80 à 240	
	Rigidité diélectrique	20 à 30 V	
	Fréquence limite	300 à 500 MHz	
	Surface requise	$10^4 \mu^2$	$I_C = 10 \text{ mA}$
Diodes	Tension directe (U_F)	0,9 V	$I_F = 10 \text{ mA}$
	Tension de claquage	7 V	
	Surface requise	$0,7 \cdot 10^4 \mu^2$	$I_F = 10 \text{ mA}$
Condensateurs	Capacité (C)	1 à 500 pF	
	Tolérance de (C)	$\leq \pm 20 \%$	
	Surface requise	$40 \cdot 10^4 \mu^2$	$C = 50 \text{ pF}$
Résistances	Résistance (R)	50 à 50 000 Ω	
	Tolérance de (R) (fabrication)	$\leq \pm 20 \%$	
	Surface requise	$2 \cdot 10^4 \mu^2$	$R = 20 \text{ 000 } \Omega$

Fig. 113 Exemple d'un circuit monolithique intégré. Les surfaces claires représentent les liaisons conductrices entre composants.



Types et propriétés des circuits intégrés

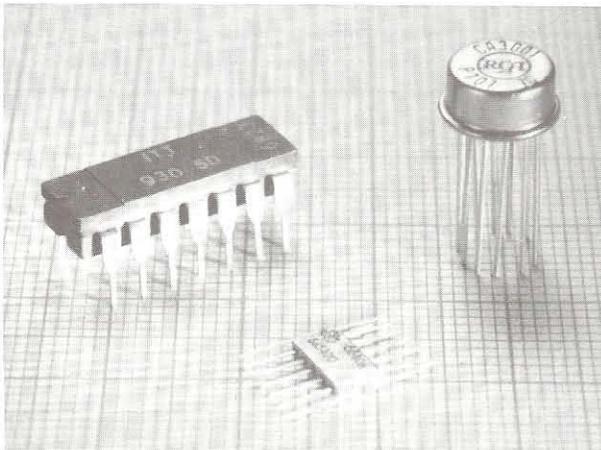
Les tâches imposées actuellement aux circuits intégrés exigent dans tous les cas la recherche de la solution optimale. Celle-ci requiert d'une part le choix judicieux des éléments planar à intégrer et, d'autre part, une bonne adaptation réciproque des caractéristiques électriques de ces éléments. En règle générale, les chips présentent non seulement de meilleures propriétés que les circuits conventionnels réalisés avec des éléments séparés, mais ils sont de surcroît meilleur marché — l'utilisation très poussée de l'espace étant à cet égard un facteur important. En raison de la régularité de la diffusion des atomes dans le chip, les caractéristiques électriques des composants de même nature ne diffèrent que très peu entre elles. La tolérance est inférieure à $\pm 5\%$. Enfin, les éléments d'un même chip étant toujours à la même température, on n'a pas à redouter une extension de la tolérance provoquée par un déséquilibre thermique.

Circuit analogique et circuit digital

La caractéristique essentielle des circuits *analogiques* est la continuité de la relation entre le signal d'entrée et le signal de sortie. Par exemple, un poids, ou une variation de poids, est indiqué sur une bascule par la déviation d'une aiguille sur un cadran. Cette indication est continue c'est-à-dire "analogue" à la charge représentée par le poids. Autre exemple: une petite tension appliquée à l'entrée d'un amplificateur électronique se traduit par une forte tension de sortie. Ainsi, les variations momentanées de la tension d'entrée sont fidèlement reproduites à la sortie, sous une forme amplifiée.

Les circuits intégrés conviennent pour la transcription analogique de phénomènes électriques. On obtient un gain d'amplification élevé en montant par exemple plusieurs étages amplificateurs en série. Le nombre de composants par chip est augmenté en conséquence. Les circuits analogiques intégrés sont de plus en plus employés en électronique de loisirs. Actuellement, on fabrique surtout, pour les récepteurs radio et téléviseurs, des amplificateurs haute fréquence et des étages de sortie réalisés selon la technique monolithique. La figure ci-dessous représente un étage haute fréquence qui constitue un exemple d'intégration de 14 résistances,

Fig. 114 Types de circuits intégrés
à gauche: boîtier dual-in-line
au milieu: boîtier plat
à droite: capsule TO5

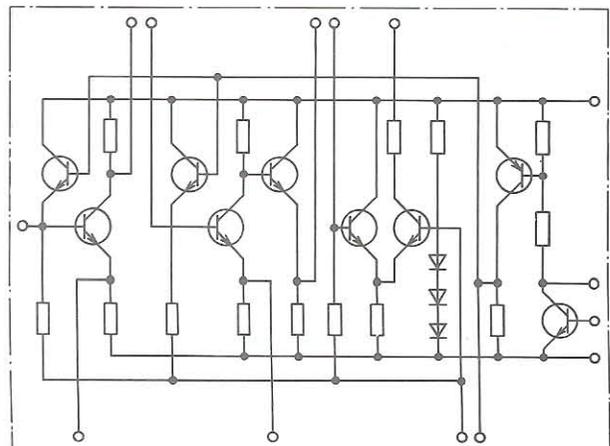


3 diodes et 9 transistors. Nous vous engageons à essayer d'identifier sur ce schéma les transistors pnp et les transistors npn. En électricité automobile également, l'utilisation de circuits intégrés est de plus en plus fréquente. Il existe actuellement, par exemple, des centrales clignotantes, des régulateurs intégrés et des transistors de commutation pour l'allumage.

C'est particulièrement dans les appareils de mesure et les ordinateurs que l'on trouve des circuits digitaux intégrés, mais également en électronique industrielle, par exemple pour la commande et la régulation des opérations de fabrication (calculateur de procédé).

Toute représentation d'une quantité débute par un comptage sur les doigts. Le calcul primitif du petit écolier, effectué à l'aide des doigts, est un pur *calcul digital* (latin digitus = doigt). Pour la représentation des valeurs et pour les informations numériques, nous utilisons les nombres, donc une suite de chiffres entièrement déterminée. Dans les véhicules automobiles, on dispose d'informations quantitatives, digitales et analogiques. Considérons le tableau de bord: l'indication du kilométrage est digitale et procède par conséquent par bonds; au contraire, l'indication de la vitesse est analogique. Un autre système digital moderne est représenté par le téléphone automatique. On dispose ici des chiffres 0 à 9, c'est-à-dire, au total, de 10 *valeurs de combinaisons*. On obtient la liaison téléphonique désirée grâce au numéro de téléphone correspondant utilisé comme "clé" (code). Pour le trafic télégraphique morse, on n'utilise que trois valeurs de combinaisons: le trait, le point et l'intervalle. L'interrupteur électrique est un système digital encore plus simple, qui n'utilise en fait de valeurs de combinaisons que les informations "arrêt" et "marche". La communication et la mise en mémoire modernes d'informations — pour autant que les fonctions procèdent d'ordres digitaux — ne nécessitent, en règle générale, que deux valeurs de combinaisons: 0 (= non) et 1 (= oui). Un tel système d'informations est appelé *système binaire*. Le calculateur électronique représente un système de combinaisons très compliqué, qui doit traiter une foule d'informations dans un temps très bref. Enfin, le bricoleur électronique chevronné sait que la télécommande de son avion ou de son bateau en modèle réduit est basée sur d'ingénieux circuits miniaturisés relevant de la technique de commande par impulsions digitales.

Fig. 115 Schéma d'un étage amplificateur haute fréquence intégré pour appareils de l'électronique de loisirs.



Le circuit intégré a fait ses preuves et s'est imposé au premier chef en technique digitale; en effet, avec un nombre relativement peu élevé de types de ces circuits, qu'on peut facilement associer suivant le but poursuivi, on réalise une infinité de combinaisons logiques. Cette signalisation commode présente l'avantage, pour les chips monolithiques, d'admettre de fortes tolérances en ce qui concerne les caractéristiques électriques, alors que les circuits analogiques sont beaucoup plus exigeants.

Ce qu'il faut savoir des circuits hybrides

Les circuits hybrides relèvent d'un système de montage réalisé avec des composants issus des différents procédés de fabrication; d'autre part, leur construction même ne présente pas d'unité. C'est pourquoi on leur a donné cette désignation quelque peu insolite de circuits hybrides (hybride = bâtard).

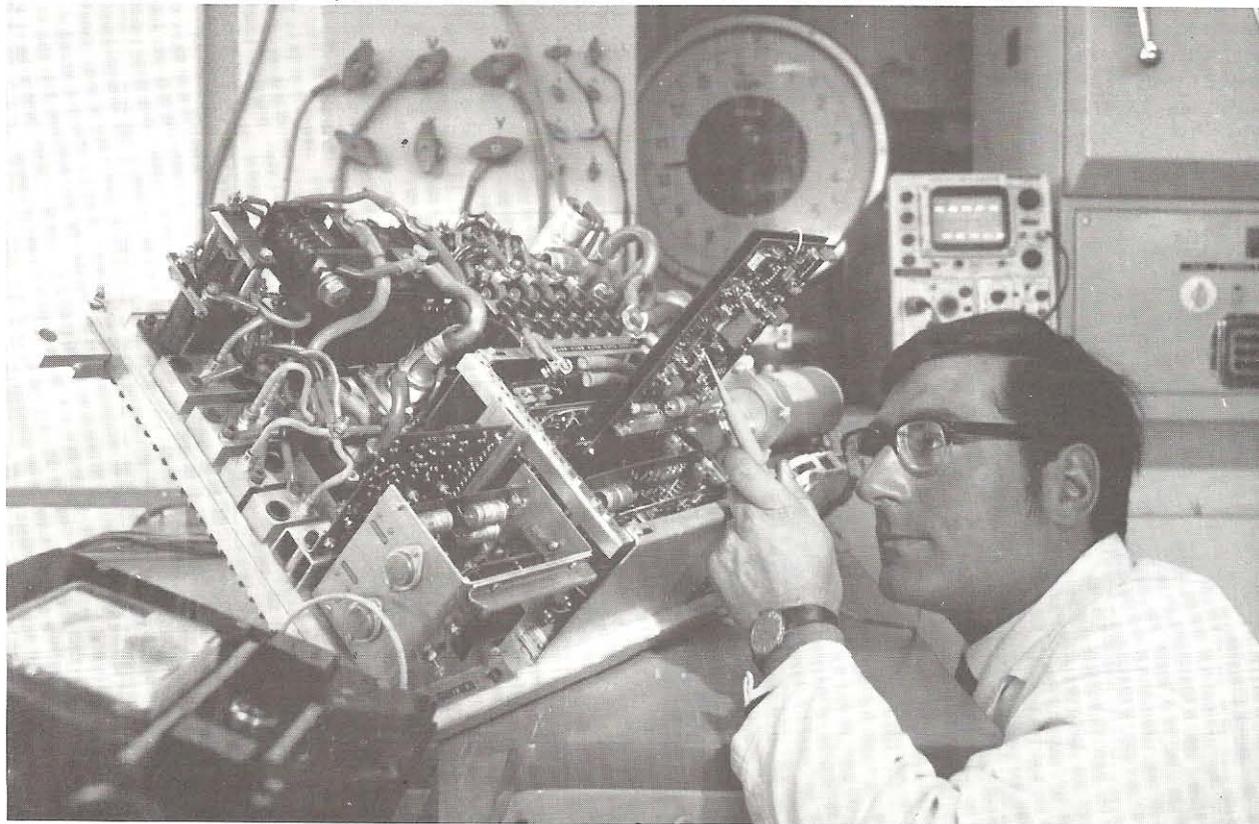
Suivant les procédés d'exécution que nous avons vus précédemment, le bloc de base cristallin, avec ses éléments de montage intégrés, constitue une unité définie, le chip. Le circuit hybride ne possède pas cette unité. Il est constitué d'un porteur d'éléments et de composants, pour la plupart séparés, qui sont reliés au support du circuit par soudage, par vaporisation ou par procédé sérigraphique. En premier lieu, le matériau du support est un élément déterminant du choix des composants et de leur mode de connexion. On utilise certaines sortes de verre, de l'oxyde d'aluminium, du papier bakérisé ou de la céramique. Les supports de circuits en verre ou matériau analogue, parfaitement isolés électriquement, sont pourvus de connexions, de

résistances, et parfois d'inductances, sous forme de couches métalliques très minces (tantal, or, aluminium et autres) déposées par vaporisation. Pour économiser la surface, on leur donne des formes très particulières par masquage ou par décapage ultérieur à l'acide. De telles plaques à circuits imprimés portent, appliqués par impression sur l'autre face, des éléments tels que condensateurs, résistances, etc. Ce "circuit imprimé" est encore appelé "platine" ou "print". Il constituait naguère la première étape de l'intégration d'éléments individuels et il a apporté des avantages importants par comparaison au "câblage primitif". Les circuits imprimés ne nécessitent pas d'entretien. Les supports en céramique reçoivent, par procédé sérigraphique, des pâtes conductrices de courant dites "couches épaisses". Après impression, cette pâte est cuite à haute température. Les autres composants qui peuvent être intégrés sont réalisés sur des chips monolithiques ou sous forme d'éléments individuels et connectés suivant des procédés spéciaux. Depuis peu, on utilise en quantité croissante des sous-groupes de circuits à haute intégration (LSI) pour la réalisation de circuits hybrides. On parvient ainsi à une utilisation tout à fait rationnelle de l'espace.

Les circuits hybrides présentent des avantages dans les domaines où les circuits intégrés monolithiques ne donnent pas entière satisfaction, par exemple en électronique de puissance. Il est donc clair que ces deux types de circuits n'entrent pas en concurrence, mais qu'ils se complètent au contraire dans une large mesure. Actuellement, le circuit intégré monolithique et le circuit hybride ont conquis chacun leur domaine spécifique dans l'électronique en général.

Fig. 116 Dans le domaine de l'électricité automobile, la Société Robert Bosch a depuis longtemps ouvert la voie à l'électronique. Grâce à elle, une branche bien particulière s'est entre-temps largement développée: *l'électronique dans l'automobile*. Une

brochure spéciale, publiée dans la série des notices techniques Robert Bosch, vous donne tous les renseignements désirables sur ce thème à tous égards d'une extrême actualité.



Conclusion

En partant de la conduction électrique dans les métaux, nous vous avons fait faire connaissance avec les semi-conducteurs les plus importants et montré la place particulière que ceux-ci occupent dans le domaine des matériaux utilisés en électronique appliquée. Nous avons essayé de vous rendre compréhensible, à partir de l'atome, le fonctionnement et les propriétés des composants à semi-conducteurs. Il nous a semblé important

d'insister particulièrement sur la célèbre jonction pn des semi-conducteurs dopés, afin de vous faciliter la compréhension des phénomènes et des montages, à première vue fort compliqués, et de vous faire bénéficier — autant qu'il est possible — d'une expérience pratique en la matière.

Avec cette première notice technique "Electronique 1", nous croyons avoir préparé le terrain pour la brochure suivante "Electronique 2" qui traitera des nombreuses applications de l'électronique dans l'automobile.

Glossaire

Accepteur

Substance utilisée pour le → dopage de cristaux dans le but d'obtenir des → semi-conducteurs de type p. Il s'agit principalement du bore, de l'aluminium, du gallium et de l'indium.

Anion

Ion porteur d'une charge électrique *négative* par excès d'électrons par rapport à la charge positive du noyau (→ noyau atomique).

Atome

Le plus petit composant de la matière ou d'un élément chimique; se compose du noyau atomique et du nuage d'électrons.

Base

Partie du → transistor. La base relie l'émetteur au collecteur; elle a pour rôle de contrôler le courant de collecteur.

Capacité de la couche d'arrêt (ou capacité de transition)

Capacité du condensateur formé par la couche d'arrêt et les régions de semi-conducteurs pn. La capacité de transition, très gênante dans certains cas, particulièrement aux fréquences élevées, est utilisée techniquement dans d'autres cas (→ diodes à capacité variable).

Cathion

Ion portant une charge électrique *positive* par défaut d'électrons par rapport à la charge positive du noyau.

Charge électrique

Somme de toutes les charges élémentaires emmagasinées dans un condensateur ou dans une batterie, ou encore qui circulent dans un conducteur. Unité: coulomb (C) ou ampère-heure (Ah). 1 Ah = 3600 C

Charge élémentaire

La plus petite charge électrique, de signe négatif ou positif, existant dans la nature. Toute charge, quelle qu'elle soit, est toujours un multiple de la charge élémentaire $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C.

Charge d'espace

Cas général: charge électrique dans un espace ou une zone le plus souvent étroitement limitée, par exemple dans des corps solides, des fluides ou des gaz. Cas particulier: charge d'espace à la jonction pn, à la suite d'une diffusion d'électrons et de trous. Côté p, il existe une charge d'espace négative (accepteurs) et côté n, une charge d'espace positive (donneurs). Les deux zones de charge d'espace agissent ensemble comme couche d'arrêt.

Chip

Monocristal de matériau semi-conducteur, silicium le plus souvent, portant un → transistor planar individuel ou un → circuit intégré.

Circuit analogique

Circuit électronique à l'aide duquel une valeur d'entrée qui se modifie constamment, par exemple une tension, est convertie en une valeur de sortie "analogue" et traduite en information. Exemple: indicateur de vitesse.

Circuit digital

Circuit électronique à l'aide duquel une valeur d'entrée (constamment variable), par exemple temps qui s'écoule, est convertie en valeur de sortie numérique, c'est-à-dire traduite en impulsions d'information. Exemple: pendule digitale.

Circuit hybride

Circuit constitué de composants séparés, c'est-à-dire de composants individuels, associés avec des → circuits → monolithiques intégrés. Pour plus de détails, voir "Circuit imprimé".

Circuit imprimé

Les composants sont insérés et soudés sur une face d'une → plaque à circuit imprimé. Les liaisons conductrices, de même que certaines résistances, sont réalisées par des chemins de métal plus ou moins larges mais toujours très minces qui se trouvent sur l'autre face de la plaquette et qui, à l'origine, étaient appliqués exclusivement par impression. Avantages comparativement au "câblage primitif": vue d'ensemble très claire (facilité de maintenance), fiabilité accrue, résistance aux chocs.

Circuit intégré

Circuit électronique formé de composants à semi-conducteurs reliés à demeure les uns aux autres en un → chip monolithique. Avantages: coût de fabrication modéré et encombrement extrêmement réduit. Construction selon la → technique "planar".

Collecteur

Partie du transistor. Le collecteur reçoit de la base une affluence d'électrons ou de trous et les transmet à la connexion de collecteur.

Coefficient de température

de la résistance électrique. Le coefficient de température exprime la variation relative de la résistance lorsque la température monte de un degré. Le coefficient de température du groupe de résistances CTP est positif, celui du groupe CTN est négatif. Les métaux ont un très petit coefficient de température (positif). Il existe des alliages spéciaux (par exemple le constantan) dont le coefficient de température est pratiquement nul.

Conductance

Valeur inverse de la résistance électrique. Donc, $G = 1/R$. Unité: S (= Siemens) ou $1/\Omega$.

Conducteurs

Matériaux présentant une conductivité électrique élevée. Les conducteurs métalliques sont les meilleurs.

Conduction intrinsèque

Existe seulement dans le cas de cristaux semiconducteurs très purs et aux jonctions pn en présence d'une couche d'arrêt. Par exemple, la jonction pn d'une diode polarisée dans le sens inverse présente une conduction intrinsèque. La conduction intrinsèque est le plus souvent indésirable et elle dépend étroitement de la température du cristal. La génération de paires est à l'origine de la conduction intrinsèque.

Conductivité

La conductivité électrique (κ) est l'inverse de la résistivité (ρ); donc, $\kappa = 1/\rho$ (S/cm). Ceci ne se rapporte qu'au *matériau* mais non à un composant ou à un circuit.

Corps d'atome

Partie d'un atome, constituée du noyau atomique entouré des couches électroniques complètes.

Couche d'arrêt

Couche très fortement isolante à la jonction pn. La couche d'arrêt, dont la formation est provoquée par les charges d'espace, s'oppose à la poursuite de la diffusion des porteurs de charge et bloque en outre le passage du courant quand la jonction pn est polarisée dans le sens de blocage.

Courant d'arrêt

Intensité minimum du courant de commutation pour laquelle un thyristor en état de conduction passe à l'état de blocage.

Courant de blocage

Courant circulant en sens direct dans le circuit de commutation d'un thyristor *avant* que celui-ci ne s'amorce et devienne conducteur.

Courant de trous

Partie positive du courant total d'un semiconducteur. Les porteurs de charge sont les trous. Dans les semiconducteurs du type p, le courant de trous prédomine. Le sens conventionnel du courant correspond au sens du courant de trous.

Courbe caractéristique

Courbe de fonctionnement d'un composant électronique représentant la relation caractéristique de deux facteurs de ce composant. Par exemple, intensité en fonction de la tension, résistance en fonction de la température ou de l'intensité d'éclairement.

CTN

Abréviation pour "coefficient de température négatif". Le groupe des corps CTN comprend les résistances à semiconducteurs dont la valeur ohmique diminue lorsque la température croît. Leur coefficient de température est négatif. On les nomme "thermistances CTN".

CTP

Abréviation pour "coefficient de température positif". Le groupe des corps CTP comprend les résistances à semiconducteurs dont la valeur ohmique augmente lorsque la température croît. Leur coefficient de température est positif; on les nomme "thermistances CTP".

Diffusion

Mouvement progressif d'atomes, de molécules ou de porteurs de charge suivant une chute de température ou de densité, c'est-à-dire s'effectuant d'une zone de température ou de concentration élevée vers une zone de température ou de concentration plus basse.

Diode

Élément semi-conducteur à deux connexions qui a la propriété de laisser passer le courant dans un sens et de le bloquer dans le sens inverse (soupape de courant).

Diode à capacité variable

Diode plate dont la capacité de transition est utilisée techniquement. Les diodes à capacité variable sont très utilisées comme condensateurs dans les circuits intégrés.

Diode à quatre couches

→ Thyristor non commandé, c'est-à-dire dont la gâchette est constamment en circuit ouvert. Autre expression: diode Shockley.

Diode de Zener

Diode utilisée seulement dans les domaines de blocage et de claquage. Grâce à ses propriétés, on l'emploie de diverses manières pour protéger les autres composants contre les surtensions (limitation de tension).

Donneur

Substance utilisée pour le dopage des cristaux afin d'obtenir des semiconducteurs du type n. Ce sont principalement le phosphore, l'arsenic et l'antimoine.

Dopage

Apport voulu (technique) d'impuretés dans des semiconducteurs de grande pureté par introduction de quantités infimes de substances acceptrices ou donatrices, afin d'augmenter la conductivité de ces semiconducteurs.

Effet d'avalanche

Accroissement en forme d'avalanche de la formation de paires électron-trou provoqué par le choc puissant de porteurs de charge libre entrant en collision dans le réseau cristallin d'un semiconducteur. L'effet d'avalanche à la jonction pn d'une diode polarisée en sens inverse provoque, lorsque la tension d'avalanche est dépassée, un claquage électrique: un fort courant circule alors dans le sens inverse.

Effet Zener

Effet de claquage électrique dans la couche d'arrêt d'une diode ou d'une diode Zener polarisée en sens inverse, provoqué par un brusque accroissement de la conduction intrinsèque par suite d'une très forte élévation de l'intensité du champ dans la jonction pn.

Electron

Élément constitutif d'un atome, porteur d'une charge électrique négative. L'électron possède une charge correspondant à la charge élémentaire et une masse de $9 \cdot 10^{-28}$ g.

Electron de conduction

Electron se déplaçant librement, c'est-à-dire non relié à un atome. Dans les conducteurs, les électrons de conduction assurent le transport de tout le courant, et partiellement seulement dans les semiconducteurs.

Electron de valence

Electron appartenant à la couche externe du nuage électronique de l'atome. Le nombre d'électrons de valence par atome détermine la valence ainsi que toutes les propriétés chimiques et physiques de l'atome considéré.

Emetteur

Partie d'un → transistor dont le rôle est d'injecter (d'émettre) des électrons ou des trous dans la base.

Gâchette

Electrode de commande de certains composants à semiconducteurs, d'un → thyristor par exemple.

Génération de paires

Formation de paires électron-trou dans les semiconducteurs sous l'effet de la température ou de la lumière. Ces paires provoquent la → conduction intrinsèque.

Germanium (Ge)

Élément chimique tétravalent de densité 5,32. Un des corps initiaux les plus employés dans la fabrication des composants à semiconducteurs. Le germanium extra-pur, ou germanium non dopé, est un semiconducteur intrinsèque dont la résistivité est de $64 \Omega \text{ cm}$ à 27°C .

Ion

Atome ou molécule portant une charge élémentaire (excédentaire) ou plusieurs charges élémentaires. La charge électrique de l'ion peut être positive ou négative.

Implantation d'ions

Procédé économique et très précis de dopage des semiconducteurs électroniques.

Isolant

Matériau de nature non métallique, utilisé en électrotechnique, et qui conduit extrêmement mal le courant électrique. Sa → résistivité est très élevée. Il n'existe pas d'isolant idéal.

Jonction pn

Zone limite entre région de type p et région de type n d'un monocristal semiconducteur à propriétés particulières caractérisant les composants à semiconducteurs.

LDR

Abréviation de "Light Dependent Resistor". Le groupe des substances LDR comprend les semiconducteurs dont la conductivité est d'autant plus élevée qu'on les soumet à un éclairage plus intense. Voir à → "Photo-résistances".

L'électronique dans l'automobile

De nombreux organes et groupes fonctionnels de l'équipement électrique automobile sont très avantageusement équipés de composants électroniques d'encombrement très réduit, relevant de la technique des semiconducteurs. On tend de plus en plus à remplacer les contacteurs électromagnétiques soumis à des conditions sévères et dont les performances ne sont plus susceptibles d'être améliorées par des commutateurs électroniques de fonctionnement rapide et sûr qui ne sont pas soumis à l'usure. L'équipement des circuits de régulation et des circuits principaux représente une nouvelle étape vers l'électronisation intégrale.

Liaison de valence

Force de liaison entre deux atomes, suscitée par un échange permanent des électrons de valence.

Microélectronique

Systèmes de montages électroniques dont les composants et les liaisons sont de dimensions extrêmement réduites. On range dans cette catégorie d'abord les → circuits intégrés, puis les éléments et circuits de la technique des films épais et minces.

Miniaturisation

Procédé de fabrication de composants électroniques et de circuits complets visant à la réduction poussée de leurs dimensions et permettant une utilisation rationnelle de l'espace disponible, une réalisation très compacte et une grande économie de matériaux.

Monocristal

Cristal à structure homogène par opposition au → polycristal. Les gros monocristaux requis par la technique des semiconducteurs sont obtenus par des procédés spéciaux.

Monolithe

Voir "Monocristal".

Neutron

Particule élémentaire électriquement neutre que l'on trouve dans le → noyau atomique. Son rôle principal est d'assurer la cohésion du noyau.

Noyau atomique

Centre de l'atome et en même temps centre de gravité de celui-ci; toute la masse atomique s'y concentre. Le noyau atomique possède une charge électrique positive et se compose principalement de → protons et de → neutrons.

Ordinateur

Dispositif électronique très complexe qui maîtrise avec une très grande rapidité et une précision élevée une infinité de calculs. Expression synonyme: calculateur électronique.

Photodiode

Diode polarisée dans le sens inverse et dont la couche d'arrêt est soumise à un flux lumineux. Le courant inverse (courant photoélectrique) est d'autant plus intense que l'intensité de l'éclairement est elle-même plus forte.

Photorésistance

Matériaux semiconducteurs dont la résistance diminue lorsqu'on les soumet à un flux lumineux. Appartiennent au groupe de substances → LDR.

Plaque à circuit imprimé

Plaque en matériau électriquement isolant sur une face de laquelle les composants du circuit électronique sont insérés. Sur l'autre face, de minces chemins conducteurs (films) tiennent lieu de connexions. L'ensemble a reçu le nom de → "circuit imprimé".

Polycristal

Contrairement au → monocristal, le polycristal est composé de nombreux petits cristaux, le plus souvent microscopiques, nommés "grains". Les grains sont reliés les uns aux autres pour former une masse dure, ou diversement ductile. Presque tous les corps solides ont une structure polycristalline.

Porteur de charge

Porteur d'une charge électrique, le plus souvent d'une seule charge élémentaire. Les porteurs de charge négative sont les électrons de conduction et les anions. Les porteurs de charge positive sont les trous, les cations et les protons.

Proton

Particule élémentaire électrique positive entrant dans la constitution du → noyau atomique. Le proton est 1837 fois plus lourd que l'électron.

Puissance dissipée

Puissance consommée par un composant électronique. La puissance dissipée maximum ($P_{V \max}$), fixée par le constructeur, est un facteur essentiel pour la vie du composant. Elle ne doit pas être dépassée en service permanent afin d'éviter le risque de surchauffement.

Recombinaison

Annulation de deux → charges élémentaires dans un semiconducteur bipolaire lorsqu'un trou (+) piège un électron (-). Le trou et l'électron disparaissent en tant que porteurs de charge.

Redondance

Surplus de composants et de groupes de commutation, dans un ordinateur électronique par exemple. Ce surplus constitue une réserve d'éléments de rechange immédiatement disponibles en cas de défaillance de composants ou de groupes de commutation. La redondance réduit la sujétion du ordinateur aux pannes de longue durée.

Résistance (R)

D'après la loi d'Ohm, rapport de la tension à l'intensité, soit $R = U/I$. Unité Ω . La résistance d'un fil est fonction de la résistivité du matériau, de sa longueur et de sa section.

Résistances

Les composants à fonctions multiples utilisés en électrotechnique sont fabriqués à partir de matériaux les plus divers. Parfois les résistances doivent demeurer constantes, même dans les conditions de service les plus extrêmes (résistances fixes, résistances étalon). Dans d'autres cas, elles doivent pouvoir varier (résistances variables, réglables à la main ou mécaniquement). Actuellement, les résistances auto-réglables ont une importance particulière; ce sont celles dont la valeur se modifie sous l'influence de la température, de la tension, de l'éclairement auquel on les soumet, etc . . . De telles résistances se composent généralement de matériaux semiconducteurs. Elles trouvent leur utilisation dans les techniques de commande et de régulation électroniques.

Résistivité

Valeur inverse de la → conductivité électrique, caractéristique du matériau de construction d'un élément considéré ou d'un câble conducteur. On l'exprime par $\rho = 1/\kappa$ ($\Omega \text{ cm}$).

Semiconducteurs

Groupe de corps d'une importance capitale en technique électronique. Au point de vue résistance, les semiconducteurs se situent entre les → conducteurs et les → isolants.

Semiconducteurs type n

Semiconducteurs dopés avec des impuretés donatrices et dont la conductivité est principalement due à des électrons de conduction.

Semiconducteurs type p

Semiconducteurs dopés avec des impuretés acceptrices et dont la conductivité est principalement due aux → trous.

Semiconducteurs électroniques

Semiconducteurs dans lesquels l'électricité est conduite par des électrons et/ou par des trous. Exemples de semiconducteurs électroniques: silicium, germanium, jonctions intermétalliques.

Semiconducteurs ioniques

Dans les semiconducteurs ioniques, la conduction électrique est assurée par des ions. Il se produit alors un transport de matière qui modifie le matériau du semiconducteur ionique. C'est pourquoi celui-ci est peu indiqué pour la réalisation de composants électroniques.

Sens conventionnel du courant

Fixation originelle arbitraire du sens du courant suivant laquelle celui-ci circule du positif au négatif. Le sens conventionnel du courant correspond au → courant de trous et est indiqué par des flèches sur les schémas de montage des diodes, transistors et thyristors.

Silicium (Si)

Élément chimique tétravalent de densité 2,4. Actuellement, l'un des matériaux les plus utilisés dans la fabrication des composants à semiconducteurs. Le silicium extra-pur, par conséquent non dopé, est un semiconducteur à conduction intrinsèque dont la résistivité est de $230\,000 \Omega \text{ cm}$ à la température de 27°C . On le trouve en quantité presque illimitée sous forme de quartz (SiO_2).

Technique planar

Procédé spécial de fabrication de composants à semi-conducteurs à jonctions pn. Matériau de construction: bloc de base en \rightarrow monocristal (Si), préalablement dopé, sur lequel on forme, dans un même plan, par dopage suivant le procédé de diffusion, les couches p et n.

Tension de diffusion

Tension qui se produit sous l'action de la diffusion d'électrons et de trous à la \rightarrow jonction pn d'un semi-conducteur.

Tension de seuil

Tension pour laquelle le courant s'établit brusquement dans une diode à semi-conducteurs polarisée dans le sens direct.

Thermistance

Résistance à semi-conducteurs dont la valeur ohmique dépend fortement de la température. On distingue deux groupes principaux de thermistances: \rightarrow CTP et \rightarrow CTN. La désignation thermistance est une contraction de l'expression "Thermally Sensitive Resistor".

Thermistance CTN

Résistance à semi-conducteurs à coefficient de température négatif.

Thermistance CTP

Résistance à semi-conducteurs à coefficient de température positif.

Thyristor

Composant à semi-conducteurs contrôlable, utilisé en électronique de puissance. Il permet de couper et de rétablir des courants d'une intensité allant jusqu'à 1 000 ampères. Le thyristor comporte 4 régions (très minces) de semi-conducteurs, dont trois portent des connexions électriques et se nomment anode, cathode et \rightarrow gâchette.

Transistor

Important composant à semi-conducteurs utilisé en électronique appliquée avec lequel on peut aussi bien amplifier le courant que l'établir ou le couper. Le transistor comprend trois régions de semi-conducteurs: \rightarrow émetteur, \rightarrow collecteur et \rightarrow base.

Transistor allié

Transistor dont l'émetteur et le collecteur sont obtenus par alliage de l'impureté de dopage avec la plaquette de base elle-même préalablement dopée. Exemple: transistor allié pnp; la base n a été allié avec des impuretés acceptrices.

Transistor à diffusion

Transistor qui a subi au moins un dopage par diffusion de donneurs ou d'accepteurs.

Transistor de commutation

Transistor, le plus souvent de grande puissance, permettant, par l'intermédiaire de la base, de contrôler un courant de forte intensité (I_C) suivant un rythme de commande donné. Le transistor de commutation constitue un interrupteur électronique présentant de gros avantages sur les commutateurs électromagnétiques et relais.

Transistor planar

Transistor obtenu par le procédé planar.

Triac

Association par construction de deux thyristors qui sont connectés tête-bêche et en parallèle (montage antiparallèle intérieur). Le triac contrôle le courant alternatif dans les *deux sens*, le thyristor dans *un seul sens* seulement.

Trou

Emplacement vide laissé par un électron, et aussi brèche de liaison dans les semi-conducteurs dont les atomes sont réunis par liaisons de covalence (semi-conducteurs de valence comme Si ou Ge par exemple). Le trou est mobile, il possède une charge positive et il participe à la conduction dans le semi-conducteur considéré.

Valence

Valence chimique d'un atome qui, le plus souvent, se confond avec le nombre d'électrons de valence de cet atome.

Varactor

Diode à capacité variable dans laquelle on utilise techniquement la capacité de transition en fonction de la tension inverse.

Variode[®]

Composant à semi-conducteurs créé par la Société Robert Bosch GmbH, semblable à une diode mais dont la courbe caractéristique accuse une pente encore plus forte. La variode est réalisée en germanium; elle est utilisée dans le montage d'un régulateur de génératrice.

Varistor

Résistance à semi-conducteurs à propriété \rightarrow VDR.

VDR

Abréviation pour "Voltage Dependent Resistor". Le groupe des corps VDR comprend les résistances à semi-conducteurs dont la valeur ohmique dépend fortement de la tension, la résistance diminuant lorsque la tension croît. L'élément VDR travaille en général indépendamment du sens du courant. Mais il existe aussi, depuis peu, des éléments VDR dont le comportement dépend de ce sens.

Le page de test

... va vous permettre de vérifier si vous avez compris l'essentiel de cette notice technique. Marquez d'une croix, pour chaque question, la (ou les) réponse(s) que vous estimez juste(s). Comparez ensuite votre réponse à la réponse figurant au bas de cette page.

1. Quels sont les matériaux semi-conducteurs les plus importants utilisés en électronique?
 - a) germanium
 - b) aluminium
 - c) laiton
 - d) silicium
 - e) indium
2. Les isolants conduisent le courant électrique
 - a) non
 - b) très mal
3. Le sens conventionnel du courant correspond
 - a) au sens du courant d'électrons
 - b) au sens du courant de trous
4. Un semiconducteur non dopé est un
 - a) semiconducteur intrinsèque
 - b) semiconducteur extrinsèque
 - c) semiconducteur extra-pur
5. Comment crée-t-on un semi-conducteur de type n à partir de silicium extra-pur?
 - a) par dopage avec une substance trivalente
 - b) par dopage avec une substance tétravalente
 - c) par dopage avec une substance pentavalente
6. Qu'est-ce qu'un trou?
 - a) un proton
 - b) un électron manquant
 - c) un électron de valence manquant dans le réseau cristallin
 - d) un ion positif
7. Exemples de semiconducteurs de type p
 - a) germanium dopé avec de l'indium
 - b) silicium dopé avec de l'aluminium
 - c) silicium dopé avec du phosphore
8. Comment peut-on doper un semiconducteur?
 - a) par diffusion
 - b) par frittage
 - c) par alliage

9. Quelles sont les propriétés de la jonction pn:
 - a) redresse le courant alternatif
 - b) arrête la diffusion des porteurs de charge
 - c) possède une résistance infinie à l'état de blocage
10. Quand la diode est-elle polarisée en sens inverse?
 - a) région p reliée au pôle positif et région n au pôle négatif
 - b) branchement ci-dessus inversé
11. On utilise la diode comme:
 - a) redresseur
 - b) commutateur
 - c) amplificateur
12. La diode de Zener fonctionne:
 - a) en sens inverse
 - b) en sens direct
13. Pourquoi le transistor a-t-il supplanté les tubes électroniques?
 - a) parce qu'il est insensible à la température
 - b) parce qu'il est plus petit
 - c) parce qu'il est meilleur marché
 - d) parce qu'il est insensible aux hautes tensions
 - e) parce qu'il ne requiert pas de chauffage de cathode
14. Comment le cristal semiconducteur d'un transistor est-il dopé?
 - a) pour former une jonction pn unique
 - b) pour former une suite de régions pnp
 - c) pour former une suite de régions npn
15. Le transistor est utilisé comme
 - a) amplificateur
 - b) redresseur
 - c) commutateur
16. Lorsqu'on pousse le plus possible la miniaturisation d'un composant à semiconducteurs — c'est-à-dire lorsqu'on réduit ses dimensions à l'extrême —, le problème de la température devient
 - a) sans objet
 - b) critique
17. Les transistors portent parfois des couronnes métalliques en forme d'ailettes. Pourquoi?
 - a) protection contre la chaleur extérieure
 - b) pour améliorer leur fixation
 - c) pour le refroidissement du transistor
18. Par quelles mesures techniques de construction peut-on obtenir un transistor procurant un fort gain en amplification?
 - a) jonction pn de grande surface
 - b) jonction pn de petite surface
 - c) base mince
 - d) fort dopage de la base
 - e) faible dopage de la base

19. Les avantages incontestables du transistor utilisé comme commutateur sont:
 - a) blocage total du courant de commutation en position "Arrêt"
 - b) entretien nul
 - c) commutation silencieuse
 - d) encombrement réduit
 - e) pas de perte
 - f) rapidité de commutation
20. Quels sont les principaux caractères d'un composant à semiconducteurs réalisé suivant la technique planar?
 - a) dopage par alliage
 - b) dopage par diffusion
 - c) toutes les régions de semiconducteurs consistent en couches très minces disposées les unes au-dessus des autres ou les unes à côté des autres
 - d) on peut à volonté permuter les polarités
 - e) le composant à semiconducteurs est un polycristal
 - f) il peut être intégré
21. Qu'est-ce qu'une diode à quatre couches?
 - a) un triac
 - b) une diode
 - c) un thyristor sans connexion de gâchette
22. Un circuit intégré (monolithique) est un
 - a) circuit hybride
 - b) circuit comportant divers composants planar sur un chip de silicium
23. Les composants suivants *ne peuvent pas* être intégrés monolithiquement
 - a) résistance
 - b) condensateur
 - c) bobine magnétique
24. Avantages du circuit imprimé
 - a) dimensions extrêmement réduites
 - b) disposition très claire, d'où facilité d'utilisation
 - c) risque d'erreur très faible lors de l'insertion des composants
 - d) possibilité d'incorporation dans des circuits hybrides
 - e) spécialement sensible à la température
 - f) insensible aux chocs mécaniques

Réponses exactes:

1 a, d; 2 b; 3 b; 4 a, c; 5 c; 6 b, c; 7 a, b; 8 a, b; 9 c; 10 b; 11 a, b; 12 a; 13 b, c, e; 14 b, c; 15 a, c; 16 b; 17 c; 18 a, c, e; 19 b, c, d, f; 20 b, c, f; 21 c; 22 b; 23 c; 24 b, c, d, f.