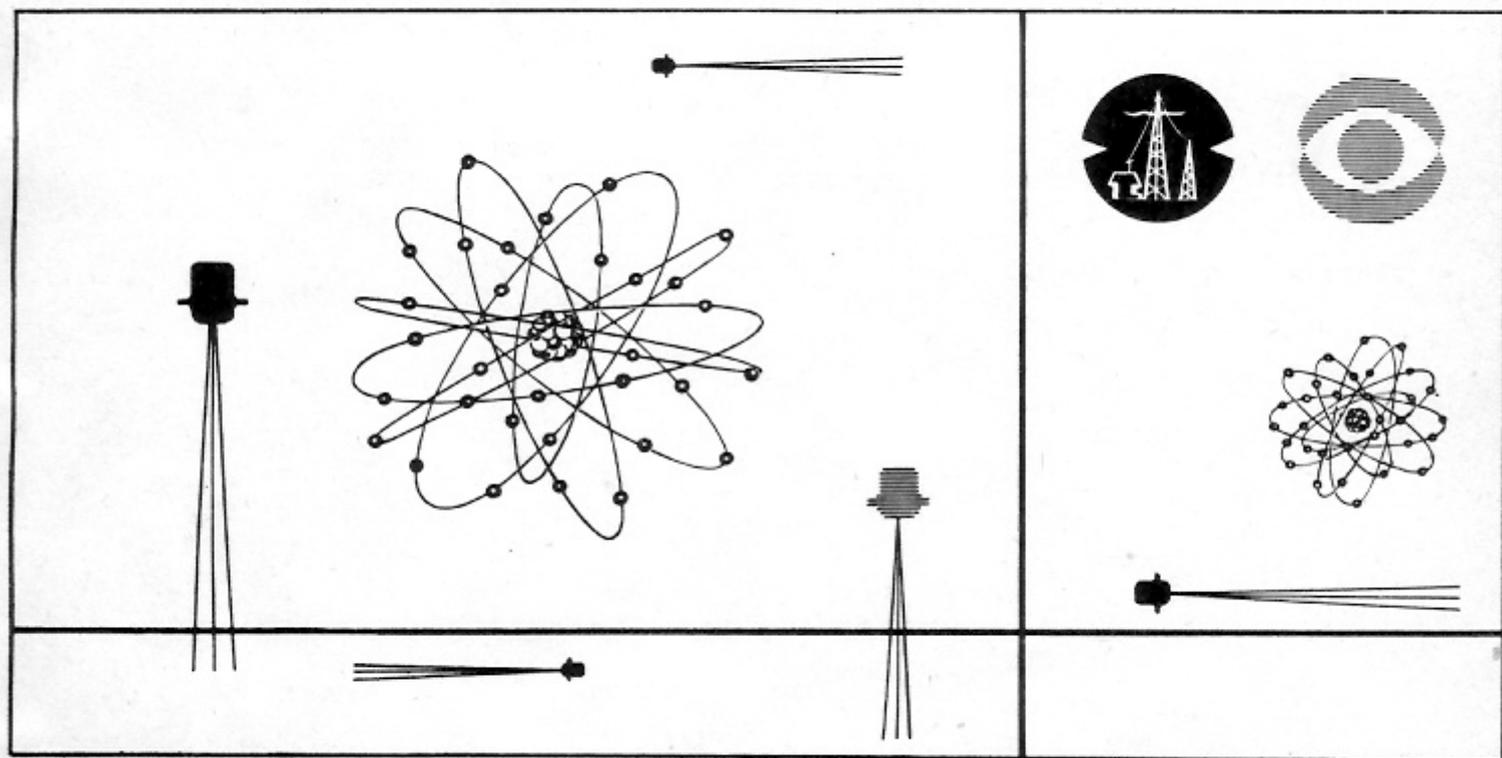


# T R A N S I S T O R S



COURS DE RADIO PAR CORRESPONDANCE

Dans cette seconde leçon je vous parlerai des métaux qui constituent la base des phénomènes utilisés dans les transistors et les semi-conducteurs en général.

Nous examinerons brièvement les caractéristiques du germanium et du silicium, et nous parlerons de la constitution de la matière et des cristaux, pour examiner enfin la description des phénomènes qui se produisent dans le transistor et régissent son fonctionnement.

LE GERMANIUM ET LE SILICIUM.

Le germanium est un élément chimique qui, peu répandu dans la nature est généralement récupéré comme sous-produit de la métallurgie du zinc; c'est en fait un corps simple comme le zinc qui se rencontre en petites quantités sous forme de composés chimiques.

Le germanium est très cher : préparé et purifié, il est le matériau de base des transistors.

Le germanium fond à la température de  $940^{\circ}$ .

Le silicium est au contraire très répandu dans la nature et forme 87 % des minéraux de la croûte de la terre.

Malheureusement, il se trouve sous forme de composés chimiques (comme le quartz) dont il est très difficile de le séparer : le prix en est très élevé.

Le silicium fond à la température de  $1.420^{\circ}$ .

#### CONSTITUTION DE LA MATIERE.

La matière est formée d'éléments fondamentaux qui se nomment atomes : ils sont constitués d'un noyau et d'électrons qui gravitent autour du noyau sur des orbites bien stables.

Les électrons qui gravitent sur l'orbite la plus extérieure par rapport au noyau se nomment ELECTRONS DE VALENCE et ce sont eux qui prennent part aux

phénomènes chimiques ou électriques.

L'atome d'un élément quelconque peut se représenter comme à la Fig. 1-.

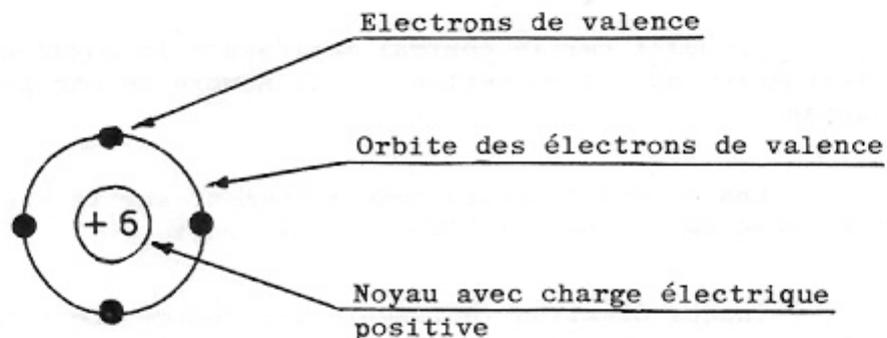
Le petit cercle central représente le noyau qui est électriquement positif ; le nombre inscrit au centre est le nombre de charges électriques élémentaires du noyau.

Les points disposés symétriquement sur la circonférence externe sont les électrons de valence placés sur leur orbite.

Chaque électron représente une charge électrique élémentaire négative ; ainsi les six charges positives du noyau de l'atome de carbone doivent correspondre à six charges négatives pour que l'atome soit électriquement neutre ; les deux charges électriques manquantes se trouvent sous forme d'électrons qui gravitent sur des orbites stables plus internes.

Quand il manque un ou plusieurs électrons de valence, l'atome s'ionise, c'est-à-dire qu'il se charge positivement.

Les phénomènes de combinaison chimique se produisent précisément entre les IONS (atomes ionisés) et ne sont que des phénomènes électriques.

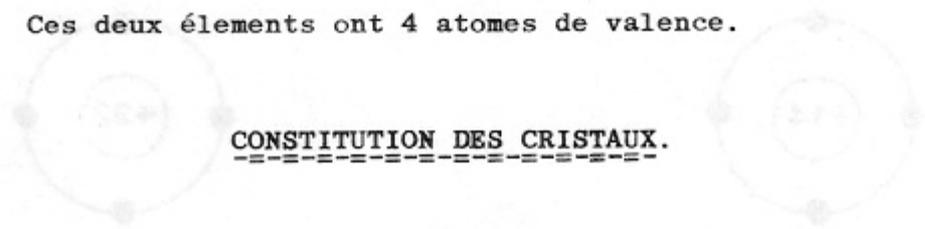


REPRESENTATION SCHEMATIQUE D'UN ATOME DE CARBONE.

Si nous enlevons à l'atome de carbone, un électron de valence, nous aurons ainsi une VALENCE LIBRE qui peut se lier à la valence libre d'un autre atome pour créer un composé chimique.

Le germanium et le silicium ont leurs atomes composés comme indiqué à la Fig. 2-.

Ces deux éléments ont 4 atomes de valence.



#### ----- CONSTITUTION DES CRISTAUX. -----

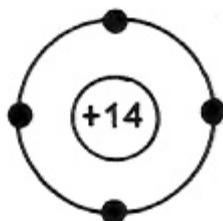
Un cristal est un système constitué de plusieurs atomes égaux ou de groupes égaux de plusieurs atomes liés entre eux par l'intermédiaire de valences libres.

Il prend généralement une forme géométrique bien définie, qui varie suivant les atomes qui le constituent.

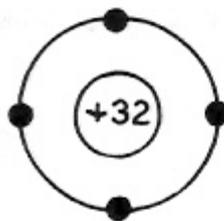
Un cristal peut également exister avec une disposition plus ou moins géométrique de plusieurs cristaux élémentaires.

Le cristal élémentaire se dit MONO-CRISTAL.

Silicium



Germanium



REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES ATOMES.

Le germanium et le silicium sont des éléments susceptibles de produire des mono-cristaux.

Dans les transistors, les petites plaques de germanium et de silicium sont obtenues en les coupant toutes parallèlement entre elles le long de l'axe bien défini (axe cristallographique) d'un mono-cristal.

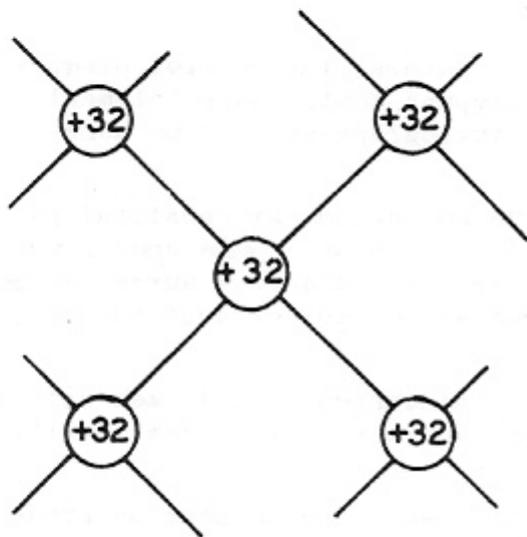
Un cristal de germanium est constitué par plusieurs atomes de germanium liés entre eux par des valences, comme vous pouvez le voir à la Fig. 3-, qui représente un atome central lié à quatre autres atomes, les valences de ces derniers se liant à d'autres atomes qui ne sont pas dessinés sur la figure.

Notez que les dimensions des atomes sont si petites que pour donner un volume de  $1 \text{ mm}^3$ , il en faudrait 45 millions de millions de millions!

La conduction électrique ne peut se produire que si ces atomes présentent un certain nombre de valences libres (c'est-à-dire d'électrons de valence non liés à d'autres atomes).

Mais dans le germanium les électrons sont solidement liés entre eux donc on n'a pas de conduction électrique :

Le germanium est un bon isolant.



STRUCTURE D'UN CRISTAL DE GERMANIUM.

ELECTRONS ET LACUNES.

Vous savez que la conduction électrique se produit par l'intermédiaire d'électrons, parcelles élémentaires d'électricité négative.

Il est nécessaire d'apprendre maintenant ce qu'est une LACUNE c'est-à-dire ce qui peut être appelé charge électrique positive.

Une LACUNE ou TROU ou CAVITE, (comme il s'agit de principes nouveaux la terminologie n'est pas encore standardisée) est la charge électrique qui se forme dans un atome d'où l'on vient d'extraire une charge négative.

Les lacunes peuvent se comparer aux bulles d'anhydride carbonique qui existent dans l'eau de seltz.

En réalité, ces bulles ne sont pas autre chose que des points où l'eau manque, remplacée par une certaine quantité de gaz ; et pourtant on les voit se déplacer dans le liquide comme s'il s'agissait de quelque chose de matériel tandis que ce ne sont que des MANQUES DE LIQUIDE.

Les lacunes se comportent de même façon dans un solide, en se déplaçant d'un point à l'autre, réalisant ainsi un passage de charges électriques, qui

seront dans ce cas POSITIVES et non négatives comme celles que vous avez considérées jusque maintenant.

LE PRINCIPE DE LA LACUNE EST FONDAMENTAL DANS L'ETUDE DES SEMI-CONDUCTEURS, PARCE QU'UN DEPLACEMENT DE LACUNES CONSTITUE UN PASSAGE DE COURANT DE LA MEME MANIERE QU'UN DEPLACEMENT D'ELECTRONS.

Il vous faut savoir maintenant que les lacunes se déplacent à travers la matière avec une vitesse nettement inférieure à celle des électrons.

GERMANIUM DE TYPE N - GERMANIUM DE TYPE P.

Afin d'obtenir l'effet de redressement dont nous allons parler, on introduit des IMPURETES dans la structure du mono-cristal de germanium ou de silicium.

Ces impuretés sont ajoutées en quantité bien contrôlée et sont d'une nature chimique, bien dosée dans le but de changer les caractéristiques électriques d'une manière voulue :

Un atome d'impureté du type à 5 électrons de valence introduit dans la structure du germanium, ne remplacera qu'un atome de germanium en liant ses pro-

pres valences avec celles des autres atomes de germanium placés à côté. Un électron de valence de cet atome d'impureté restera libre dans le cristal de germanium et l'atome se chargera positivement.

Dans ce cas la conduction se produira par l'intermédiaire de charges négatives.

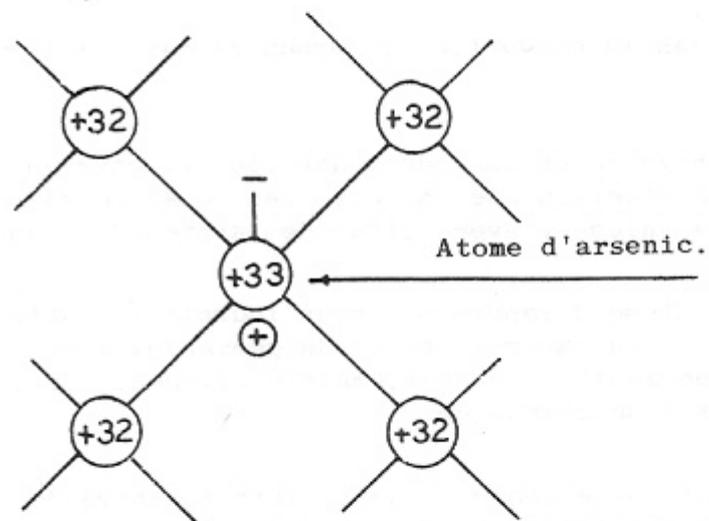
Si au contraire on introduit dans la structure du germanium un atome d'impureté du type à 3 électrons de valence, cet atome ne remplacera qu'un atome de germanium en liant ses valences avec celles des atomes de germanium voisins.

Mais cet atome d'impureté, pour fournir la quatrième valence nécessaire, peut se lier avec les autres atomes de germanium formant une lacune comme nous l'avons dit précédemment et se chargera négativement. Ici, cela servira à rendre conducteur le cristal de germanium.

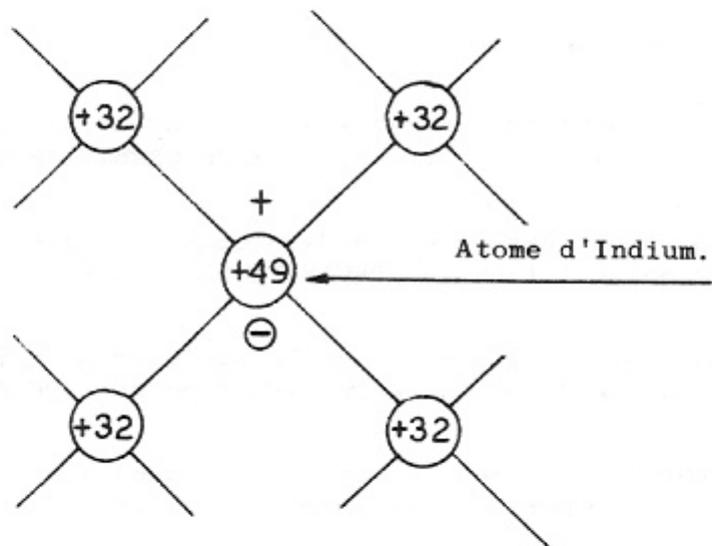
La conduction se produira par l'intermédiaire de charges positives ou pour mieux dire, par l'intermédiaire des LACUNES ; le phénomène est illustré aux Fig. 4- et 5-.

Les atomes qui ont 5 électrons de valence sont :

- L'arsenic.
- L'antimoine.



STRUCTURE DU GERMANIUM "N"



STRUCTURE DU GERMANIUM "P".

Les atomes qui ont 3 électrons de valence sont :

- Le bore.
- Le gallium.
- L'indium.

Dans le premier cas, c'est-à-dire quand on ajoute des impuretés à 5 électrons de valence, nous aurons des cristaux de GERMANIUM DE TYPE N.

Dans le second cas, c'est-à-dire quand on ajoute des électrons à 3 valences nous aurons des cristaux de GERMANIUM DE TYPE P.

La même chose se produit avec le silicium pour lequel, suivant le type d'impuretés, nous aurons du SILICIUM DE TYPE N ou DE TYPE P.

Les impuretés introduites dans le germanium sont ajoutées en quantité bien contrôlée et en proportion extrêmement réduite.

Le germanium utilisé dans les transistors doit contenir des substances impures dans une proportion d'une unité pour 100 millions.

Les impuretés ajoutées pendant la fabrication du germanium de type "N" ou "P" sont dans les proportions de 1 à 10 millions.

De là, on peut penser que la fabrication des cristaux de germanium présente une technologie difficile.

Pour terminer, nous dirons que dans le germanium de type "N" les ÉLECTRONS SERONT LIBRES TANDIS QUE LES ATOMES D'IMPURETÉS SERONT CHARGÉS POSITIVEMENT. Les charges des électrons correspondront à celles des atomes d'impuretés, de manière que l'ensemble soit électriquement neutre.

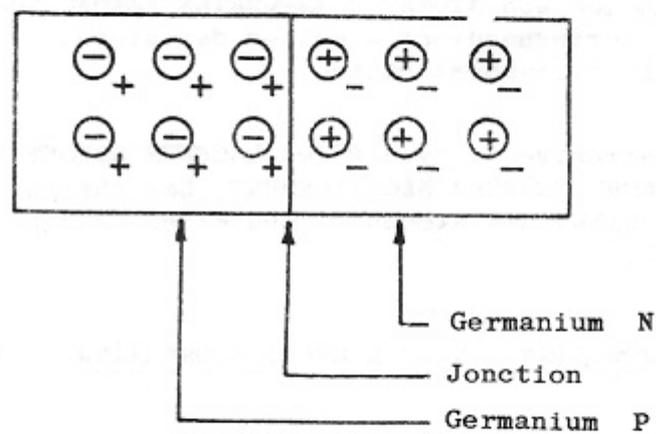
Dans le germanium de type "P" les LACUNES SERONT LIBRES TANDIS QUE LES ATOMES D'IMPURETÉS SERONT CHARGÉS NÉGATIVEMENT. Les charges des lacunes correspondront ici aussi, à celles des atomes d'impuretés, de manière que l'ensemble soit électriquement neutre.

#### LA JONCTION P-N ET L'EFFET REDRESSEUR.

Si nous prenons une section de germanium de type "N" et une section identique de type "P" et que nous les plaçons côte à côte de manière à créer une jonction interne, comme illustré à la Fig. 6, nous obtenons une DIODE AU GERMANIUM.

Les cercles placés à droite avec le signe positif, représentent les atomes d'impuretés "N", tandis que les électrons sont indiqués avec le signe - (moins)

Les cercles placés à gauche avec le signe négatif, représentent de façon analogue les atomes d'impuretés "P", tandis que les lacunes sont représentées



JONCTION DANS UNE DIODE AU GERMANIUM.

avec le signe + (plus).

On pouvait penser que cette jonction étant effectuée, les électrons libres de la diode traverseraient immédiatement la jonction pour se combiner avec les lacunes de gauche, mais en fait cela ne se produit pas.

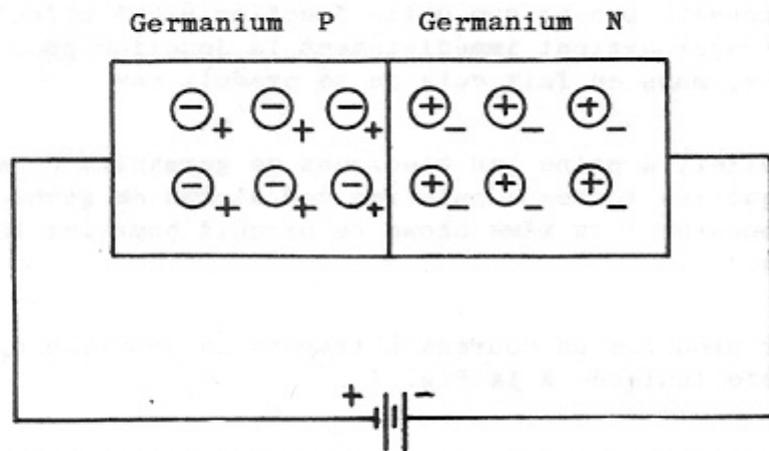
En effet, à peine les électrons de germanium "N" approchent-ils du point de jonction, que les forces répulsives des atomes de germanium "P" chargés de même signe, les repoussent ; la même chose se produit pour les lacunes qui s'approchent de la jonction.

Pour produire un courant à travers la jonction, nous branchons une batterie de la manière indiquée à la Fig. 7-.

Les électrons libres de la section "N" sont repoussés par le champ électrique de la batterie, et, en dépit des forces de répulsion, traversent la jonction pour se combiner avec les lacunes.

Pour chaque électron qui se recombine avec une lacune, la charge de l'atome correspondant dans le germanium "P", reste libre ; cette charge rejoint le pôle positif de la batterie.

L'atome se lie alors immédiatement avec une quatrième valence des atomes de germanium placés à côté, en formant une nouvelle lacune et en se



RACCORDEMENT A UNE BATTERIE POUR DETERMINER  
LE COURANT DANS UNE TRIODE AU GERMANIUM.

chargeant négativement.

Cette nouvelle lacune est repoussée par le pôle positif et traverse la jonction en se recombinant avec un électron libre en "N".

En même temps, pour chaque électron qui traverse la jonction de "N à P", un nouvel électron entre dans le cristal du pôle négatif de la batterie.

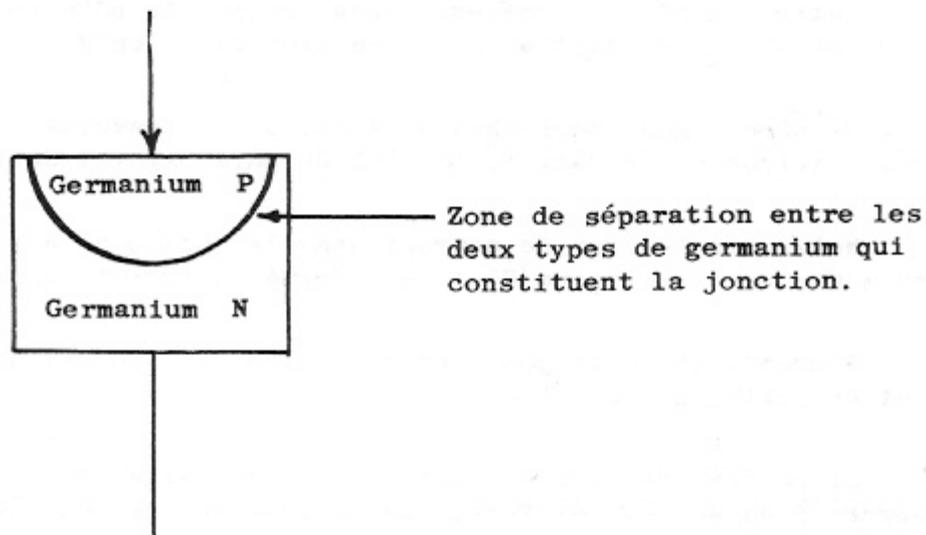
Notez que le flux de courant dans la région "N" est formé par des électrons, tandis que dans la région "P" il est formé par des lacunes.

A proximité de la jonction, le courant est constitué en partie par des électrons et en partie par des lacunes.

Si on renverse les polarités de la batterie, le champ électrique de celle-ci cherche à augmenter les forces répulsives des atomes "P" et "N" et il ne circule plus de courant.

Cet effet redresseur est semblable à ce qui se produit dans les diodes thermo-ioniques que vous connaissez.

La diode au germanium offre une polarisation relativement faible quand elle est polarisée dans un sens, et très grande quand elle est polarisée dans



JONCTION A POINTE DU TYPE "P N".

le sens contraire.

Les diodes au germanium de production courante sont du type à POINTE.

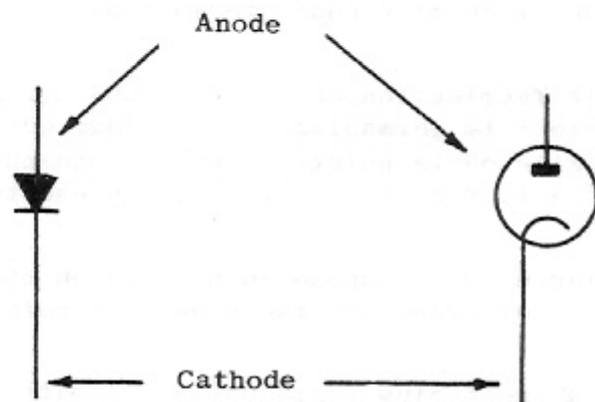
Pendant la fabrication, on effectue une opération dite de FORMATION, qui a pour but de transformer le germanium de la plaque qui est de type N, en germanium de type P, à proximité de la pointe de bronze phosphoreux : on obtient alors ce qui est illustré à la Fig. 8-, où l'on a représenté une jonction "P N".

La résistance qui s'oppose au passage du courant est faible si on relie la pointe au positif, et grande en raccordant la pointe au négatif.

La diode au germanium représentée schématiquement à la Fig. 9- se comporte comme une diode thermo-ionique quand elle est placée dans un circuit avec la pointe servant de plaque et la base de germanium servant de cathode.

Comme dans la leçon précédente je vous présente, sous forme d'un bref résumé, les idées exprimées au cours de cette nouvelle leçon.

- 1- Les atomes de matière sont formés par un noyau et par des électrons qui gravitent sur des orbites bien définies.
- 2- Les électrons les plus extérieurs, en nombre fixe pour chaque atome, s'appellent



DIODE AU GERMANIUM

DIODE THERMO-IONIQUÉ

électrons de valence : ce sont ceux qui prennent part aux phénomènes chimiques et électriques.

- 3- Le germanium et le silicium ont 4 électrons de valence.
- 4- Un cristal est un système formé par plusieurs atomes égaux, ou bien par des groupes égaux d'atomes liés entre eux au moyen de valences libres.
- 5- Un cristal élémentaire se nomme mono-cristal.
- 6- Les lacunes sont des charges électriques positives qui apparaissent quand un atome perd une charge négative.
- 7- La conduction du courant électrique se produit par les électrons ou par les lacunes.
- 8- Le germanium "N" est un mono-cristal dans lequel se trouvent des impuretés du type à 5 électrons de valence (arsenic) qui donnent naissance à la formation d'électrons libres et d'atomes d'impuretés chargées positivement.
- 9- Le germanium "P" est un mono-cristal dans lequel se trouvent des impuretés de type à 3 électrons (indium), qui provoquent la formation de lacunes, et d'atomes d'impuretés chargées négativement.
- 10- Le contact redresseur est formé par une jonction "P N" à travers laquelle le courant circule dans un seul sens, les électrons et les lacunes se déplaçant à

travers la jonction et se recombinant entre eux.

Le courant ne peut pas circuler dans le sens contraire parce que la polarité de la batterie est telle qu'elle empêche les électrons et les lacunes de traverser la jonction.

- 11- La diode au germanium à pointe peut se présenter comme une jonction, puisque à côté de la pointe se trouve le germanium "P" (obtenu pendant la formation) qui donne précisément la jonction avec le germanium restant de type "N".

-----

REPONSES AUX EXERCICES DE REVISION SUR LA 1ère LECON TRANSISTORS

- 1- Le transistor à jonction est formé par une petite plaque au germanium sur laquelle par des procédés spéciaux, ont été soudées directement et intimement des électrodes.
- 2- Le transistor à pointes est formé par une plaque de germanium sur laquelle les pointes des électrodes s'appuient avec une faible pression. Ces dernières qui sont soit du type à jonction soit du type à pointe, s'appellent émetteur et collecteur tandis que la troisième, reliée directement au germanium se nomme base.
- 3- Les transistors tendent à remplacer en partie les tubes électroniques pour plusieurs avantages dont voici certains : petites dimensions, rendement élevé aux basses fréquences, longue durée.
- 4- L'emploi des transistors est pour le moment limité à cause des inconvénients suivants : température de fonctionnement limitée et instabilité de fonctionnement dues aux variations de température, rendement faible aux fréquences très élevées bruit de fond sensible.

EXERCICE DE REVISION SUR LA 2ème LECON TRANSISTORS.

- 1- Qu'appelle-t-on électrons de valence ?
- 2- Combien le germanium et le silicium possèdent-ils d'électrons de valence ?
- 3- Ou trouve-t-on et comment obtient-on le germanium et le silicium ?
- 4- Qu'est-ce qu'une LACUNE ? Quelle comparaison peut-on en faire ?
- 5- Dans quel cas le passage du courant électrique est-il produit par l'intermédiaire d'électrons, ou au contraire de lacunes ?
- 6- Quelle est la différence entre le germanium de type "P" et de type "N" ?
- 7- Quelle est la différence fondamentale entre la vitesse des électrons et celle des lacunes à travers la matière ?

-----