



TRANSISTORS

Cours de radio par correspondance

PROCEDES DE FABRICATION.

Dans cette leçon, je vous illustrerai quelques problèmes qui intéressent la construction du transistor :

la préparation du germanium et du silicium, la purification, la formation du monocristal et ainsi de suite, jusqu'au montage des différents types de transistors, que vous avez déjà vus dans les précédentes leçons.

PREPARATION DU GERMANIUM.

Aux États-Unis, le germanium est obtenu comme sous-produit du minerai de zinc.

En Angleterre, beaucoup de dépôts naturels de charbon contiennent du germanium et celui-ci est extrait à partir des résidus de charbon.

Le germanium est employé pour la fabrication des transistors en très petite quantité mais, cependant il faut pouvoir en disposer en quantité suffisante car la perte, lors de la fabrication du transistor est importante ; son coût est élevé car il se trouve peu diffusé dans la nature.

REDUCTION DU GERMANIUM.

Dans le commerce, on ne trouve pas généralement de germanium pur mais de l'oxyde de germanium, qui se présente sous forme de poudre blanche ; il est traité dans un four à 650° en présence d'hydrogène pour être transformé en germanium pur, toujours sous forme de poudre.

La température est ensuite portée à 1.000 degrés environ, pour obtenir la fusion ; on peut ainsi le transformer en barreaux de 30 cm de longueur avec une section carrée de 9 cm^2 .

PURIFICATION DU GERMANIUM.

Le germanium doit être ensuite purifié ; le procédé habituel est celui de la fusion par étage. N'oubliez pas que le germanium employé dans les transistors doit être pur et qu'on tolère la présence d'une seule partie d'impureté

pour 100 millions de parties de germanium.

Dans le procédé de la FUSION PAR ZONES, le barreau de germanium est placé dans un creuset en graphite très pur, et l'ensemble est placé dans un tube de quartz où circule un courant de gaz inerte (par exemple l'argon). Voyez la Figure 1-.

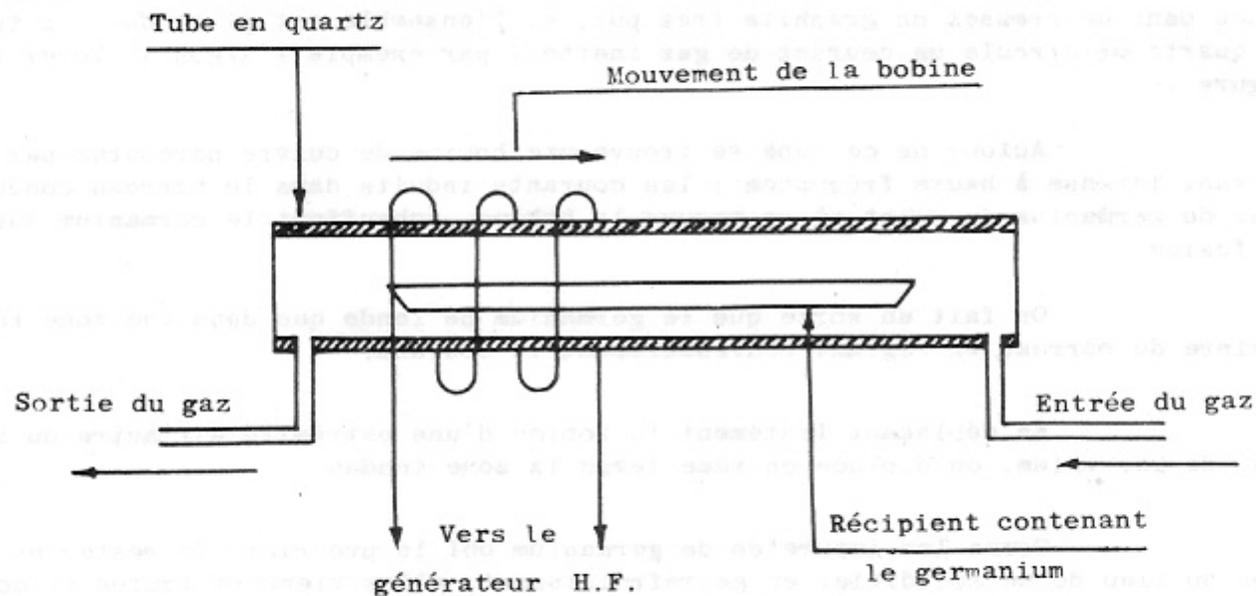
Autour de ce tube se trouve une bobine de cuivre parcourue par un courant intense à haute fréquence : les courants induits dans le barreau conducteur de germanium au point où se trouve la bobine, échauffent le germanium jusqu'à sa fusion.

On fait en sorte que le germanium ne fonde que dans une zone restreinte du barreau en réglant convenablement le courant.

En déplaçant lentement la bobine d'une extrémité à l'autre du barreau de germanium, on déplace en même temps la zone fondue.

Comme les impuretés de germanium ont la propriété de rester en fusion au lieu de se solidifier en se refroidissant, elles viennent toutes se concentrer dans la zone fondue qui se déplace jusqu'à l'extrémité du barreau.

On obtiendra alors une barre de germanium presque pure ; les impuretés sont toutes concentrées à une extrémité ; on n'emploie que la partie centrale de cette barre, et les extrémités sont de nouveau utilisées comme matériau brut.



- Fig. 1 -

DETERMINATION DES IMPURETES.

La quantité d'impuretés dans le germanium est déterminée indirectement par mesure de résistance électrique.

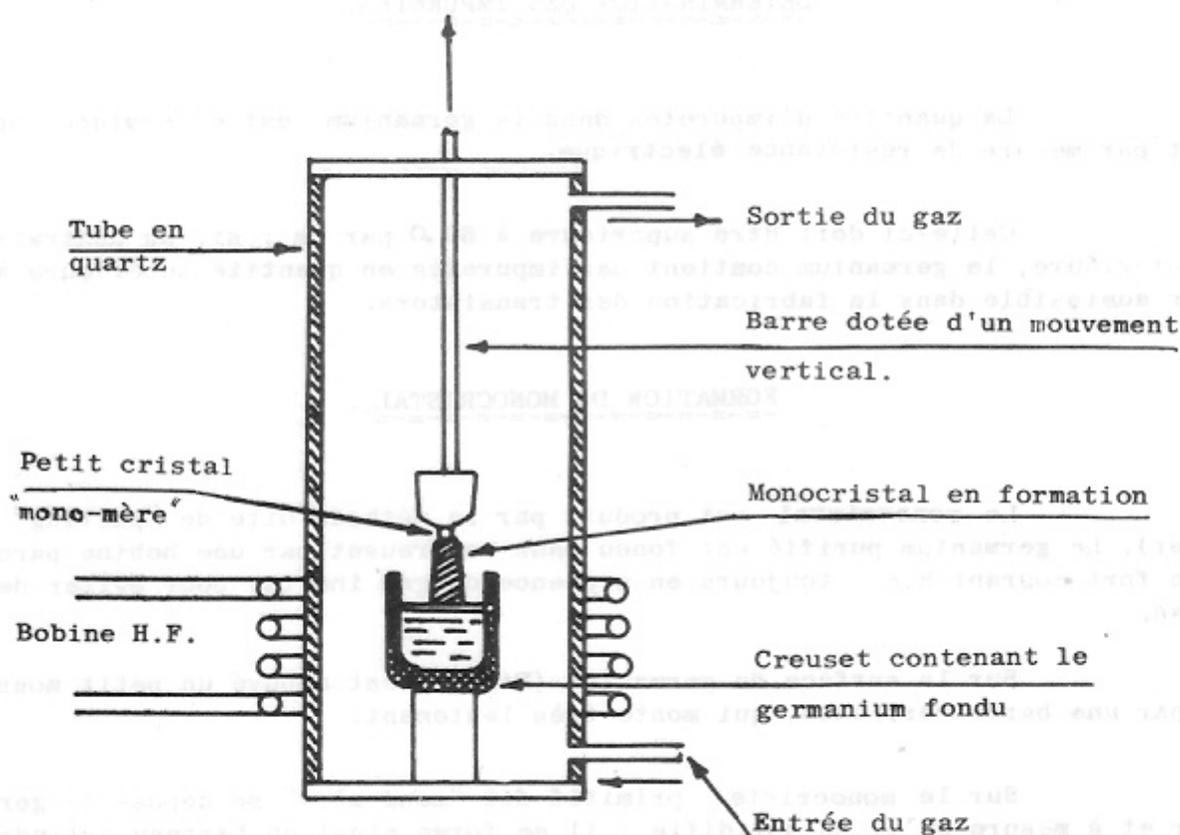
Celle-ci doit être supérieure à 60Ω par cm : si, au contraire elle est inférieure, le germanium contient des impuretés en quantité supérieure à la valeur admissible dans la fabrication des transistors.

FORMATION DU MONOCRISTAL .

Le monocristal est produit par la méthode dite de "pulling" (de pull = tirer). Le germanium purifié est fondu dans un creuset par une bobine parcourue par un fort courant H.F., toujours en présence de gaz inerte, pour éviter des oxydations.

Sur la surface du germanium (Fig.2-) est appuyé un petit monocristal tenu par une barre verticale, qui monte très lentement.

Sur le monocristal primitif dit "mono-mère" se dépose le germanium au fur et à mesure qu'il se solidifie ; il se forme ainsi un barreau cylindrique de



- Fig. 2 -

monocristal qui a une longueur d'environ 20 cm. et un diamètre de 1 cm.

Pendant l'opération, le germanium fondu est continuellement agité, de façon à maintenir uniforme la température, elle-même contrôlée avec grande précision.

Des impuretés du type "N" ou "P" sont ajoutées au germanium fondu en quantité bien déterminée et mesurée par la méthode de la résistivité spécifique.

TRAVAIL MECANIQUE DU MONOCRISTAL

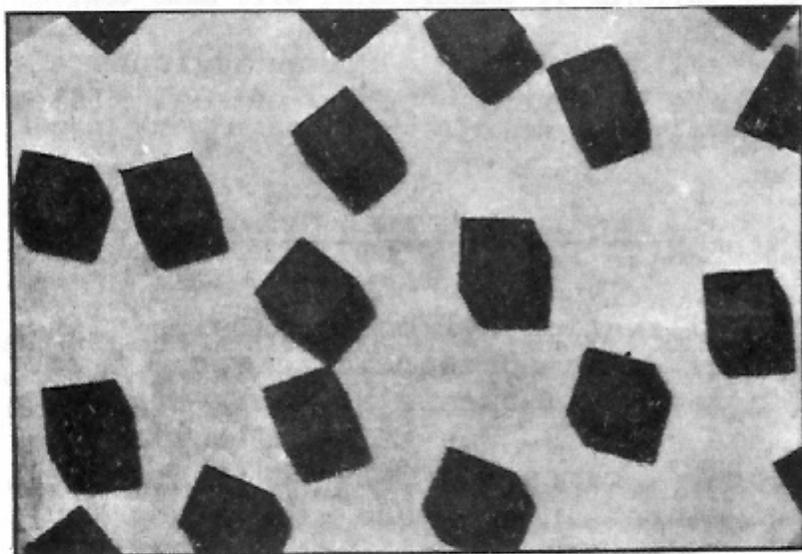
Le barreau cylindrique de monocristal est successivement coupé en tranches d'une épaisseur de 0,5 mm. environ, par des meules à disques très fins ; ces sections sont ensuite placées sur un plan et collées à celui-ci.

Une série de fines meules à disques, distantes d'environ 2 mm. les coupent d'abord en un sens, puis à 90° dans l'autre.

De cette façon on forme plusieurs petits carrés de 2 mm. de côté ayant une épaisseur de 1/2 mm. (Fig. 3-).

La poudre de germanium inutilisée est récupérée et sert comme matériau brut qui sera utilisé de nouveau lors d'un nouveau cycle de fabrication.

CRISTAUX DE GERMANIUM.



- Fig. 3 -

TRAITEMENT CHIMIQUE DES CRISTAUX.

Les cristaux obtenus par travail mécanique sont traités avec une solution acide qui les oxyde légèrement, pour enlever les traces laissées par les meules à disques et également pour les tailler aux dimensions désirées.

Quelquefois, les cristaux sont soigneusement polis avec de la poudre abrasive, de façon à obtenir une superficie déjà parfaitement plane avant le traitement chimique.

La solution acide est constituée généralement par un mélange d'acide fluorhydrique et d'acide nitrique.

TRANSISTORS A POINTES.

Les pointes qui constituent ces transistors sont faites de fil de bronze phosphoreux qui présente de très bonnes caractéristiques électriques, le phosphore ayant 5 électrons périphériques. On peut donc créer des zones de germanium "P" là où les pointes sont en contact avec le germanium "N" de la base.

Le phosphore contenu dans le bronze phosphoreux se répand dans le

germanium pendant la formation. Celle-ci consiste en une application d'impulsions électriques entre la base et les électrodes.

Le fil, avec lequel les contacts sont réalisés, a un diamètre de 0,12 mm. ; l'extrémité qui vient en contact avec le germanium est soigneusement éfilée.

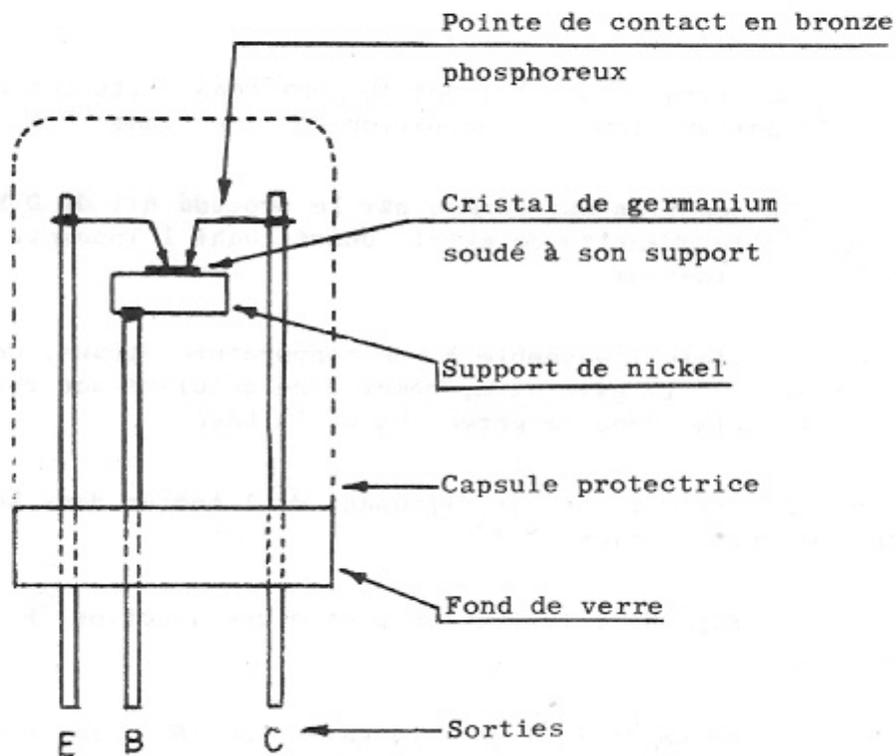
La Fig. 4- montre un transistor à pointe ; chaque partie qui le constitue est clairement indiquée.

Les trois fils de la base, émetteur et collecteur sont en cuivre étamé, d'un diamètre d'environ un demi-millimètre et sont fixés par un support de verre.

A ces fils sont soudées les pointes qui appuient légèrement sur le cristal de germanium.

Le cristal de germanium est soudé avec un alliage très fusible (70°C) à un petit support de nickel ; ce dernier est ensuite soudé au fil de cuivre de la base.

La capsule protectrice a pour but d'isoler l'ensemble de la lumière et du contact avec des corps étrangers ; la lumière en effet agit sur le germanium et fait varier ses caractéristiques.



- Fig. 4 -

TRANSISTORS A JONCTION.

Les transistors à jonction sont construits suivant plusieurs procédés, mais ils ont en commun la formation des jonctions "P N".

La jonction est formée par le procédé dit de DIFFUSION, qui consiste à déposer une petite quantité de métal, constituant l'impureté à ajouter, sur un petit cristal de germanium.

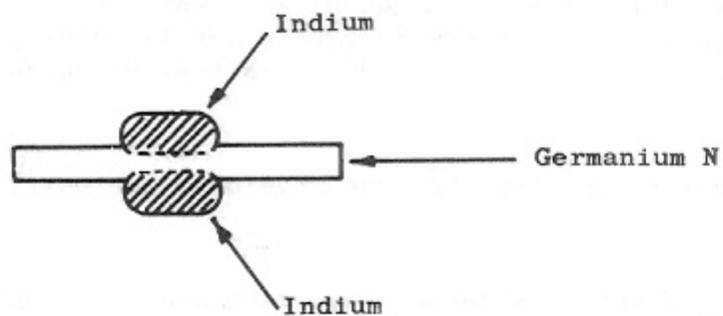
On porte l'ensemble à une température élevée, de façon à ce que le métal se diffuse dans le germanium, créant dans celui-ci une région de germanium impur à contact intime avec le germanium de la base.

De cette façon, en diffusant de l'indium dans le germanium de type "N", on obtient une jonction "P N".

La Fig. 5- illustre l'aspect d'une jonction "P N P" obtenue avec le procédé de diffusion.

L'indium diffusé dans le germanium "N" forme une région de germanium "P", tandis que la partie qui reste non diffusée est employée pour effectuer la connexion du fil ; ceci se produit généralement pendant l'opération même de diffusion,

JONCTION "P N P" OBTENUE PAR LE PROCEDE DE DIFFUSION.



- Fig. 5 -

alors que le métal qui constitue les impuretés à ajouter, se trouve à l'état de fusion.

La Fig. 6- illustre schématiquement un transistor à jonction "P N P".

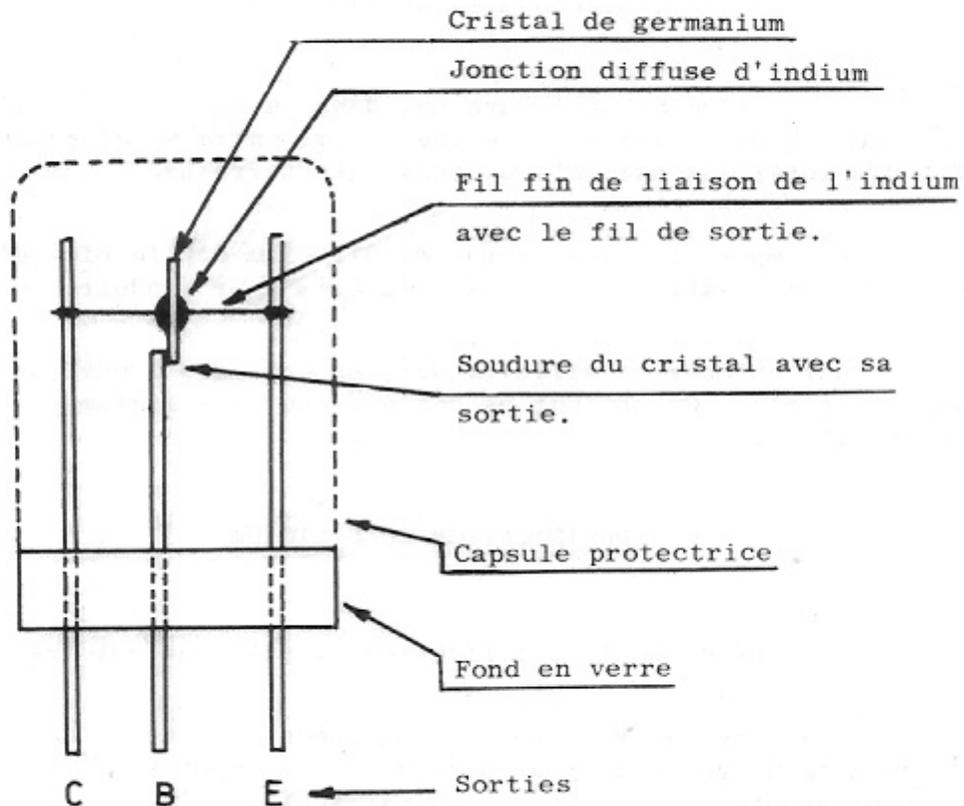
Les trois fils de la base de l'émetteur et du collecteur, sont en cuivre étamé de 1/2 mm. de diamètre. Ici également ils sont tenus par un support en verre. Le cristal de la base est soudé directement, par un alliage fusible à basse température, au fil correspondant, tandis que les deux parties d'indium non diffusées, sont raccordées aux deux fils de l'émetteur et du collecteur par de fins fils soudés ensemble .

Le tout est protégé par une enveloppe protectrice, comme pour le transistor à pointe

Il y a d'autres méthodes pour fabriquer les jonctions "P N", mais le principe reste le même.

Après l'opération de diffusion , on traite chimiquement les jonctions obtenues, par des solutions acides qui nettoient les superficies et enlèvent l'excès d'impureté.

Après avoir introduit les transistors dans la capsule protectrice étanche, on fait souvent le vide, pour augmenter la stabilité de fonctionnement.



- Fig. 6 -

PREPARATION DU SILICIUM.

Le silicium ne se trouve pas dans la nature à l'état naturel quoiqu'il soit un des éléments les plus répandus : il entre en effet dans la composition de 87 % des matériaux naturels de la croûte terrestre.

Le composé le plus commun du silicium est le bioxyde de silicium qui se trouve dans les sables quartzeux (employés pour produire le verre).

Pour obtenir du silicium pur, on chauffe à environ 3.000° C. le bioxyde avec du charbon. On obtient de cette façon du silicium pur à 97 % sous forme polycristalline.

PURIFICATION DU SILICIUM.

Le problème de la purification du silicium est très difficile.

Un des systèmes employés communément est celui de la fusion par zones, identique à celui vu, à propos du germanium. L'opération présente de grosses difficultés pour plusieurs raisons, et en particulier :

- TEMPERATURE DE FUSION PLUS ELEVEE (1.420° C.) que pour le germanium,

- FACILITE D'ABSORPTION DU GAZ PENDANT LE REFROIDISSEMENT : le silicium devient spongieux et la mesure de la résistivité électrique (que fournit indirectement le contenu d'impureté) ne peut pas être faite avec une précision suffisante,
- TENDANCE A LA CONTAMINATION CAR LES CREUSETS ne peuvent pas être en graphite, puisqu'il se combine avec le silicium.

Il existe pour la préparation du silicium pur, plusieurs procédés mis au point et étudiés par les fabricants américains de transistors (Texas Instruments, Général Electric, Bell Laboratories), quelques-uns exclusivement chimiques, d'autres au contraire, basés surtout sur les caractéristiques physiques du silicium.

Le silicium pur a une résistivité électrique d'environ 240.000 Ω par cm.

Le silicium employé dans les transistors a une résistivité d'environ 150.000 Ω par cm.

Comparant ces données avec celles du germanium (résistivité électrique du germanium pur = 60 Ω par cm), on remarque que le silicium est employé avec un taux d'impureté (qui en baisse la résistivité) relativement important.

Ceci est dû aux difficultés technologiques qui empêchent d'obtenir une pureté supérieure.

FORMATION DU MONOCRISTAL.

Le monocristal de silicium est obtenu généralement par le même système que celui du germanium.

Il se présente des difficultés supplémentaires qui exigent des précautions encore plus grandes.

TRANSISTORS AU SILICIUM.

Semblables à ceux au germanium déjà décrits, par leur fabrication et par les caractéristiques de fonctionnement, les transistors au silicium se différencient des précédents pour les raisons suivantes :

- 1- Ils sont moins aptes à fonctionner à des fréquences aussi élevées que les transistors au germanium.
- 2- Ils sont moins sensibles aux variations de température.
- 3- Ils peuvent fonctionner à des températures plus élevées et peuvent être construits pour des puissances plus élevées.

Le transistor au silicium n'a été fabriqué commercialement qu'en 1954, alors que dès 1948 on avait prévu ses possibilités de fonctionnement.

Terminant cette leçon, je vous donne un bref résumé des points que nous avons traités :

- 1- Préparation du germanium à partir de sous-produits de la métallurgie du zinc ou des résidus du charbon.
- 2- Réduction de l'oxyde de germanium en présence de gaz réducteur (hydrogène) et fusion de la poudre de germanium pour en faire des barreaux.
- 3- Purification par zones, exploitant le principe d'après lequel les impuretés restent en général dans la zone fondue.
- 4- Dosage du contenu d'impureté, obtenu indirectement par une mesure de résistivité électrique spécifique.
- 5- Formation du monocristal par la méthode dite de "pulling" qui consiste en une cristallisation progressive et continue sur un monocristal initial.
- 6- Découpe mécanique pour obtenir d'abord de fines sections, puis des petits carrés de cristal.

- 7- Traitement chimique de purification, souvent précédé par un polissage très fin, à l'émeri, des surfaces des petits cristaux obtenus.
- 8- Construction et montage du transistor à pointe ; formation par des impulsions électriques.
- 9- Construction et montage du transistor à jonction et création des jonctions par le procédé de diffusion des impuretés.
- 10- Préparation du silicium, sa purification, formation du monocristal et difficulté de production.
- 11- Différences importantes entre les transistors au germanium et les transistors au silicium ; ces derniers ont l'avantage d'être moins sensibles aux variations de température et de pouvoir fonctionner à des températures plus élevées; leur inconvénient actuel est de moins bien fonctionner aux fréquences élevées.

REPONSES AUX EXERCICES DE REVISION SUR LA 3ème LECON TRANSISTORS.

- 1- Le transistor "N P N" doit être polarisé avec l'émetteur négatif et le collecteur positif par rapport à la base ; le transistor "P N P" avec l'émetteur positif et le collecteur négatif par rapport à la base.
- 2- Environ 95 % des électrons libres du transistor "N P N" traversent la base sans se joindre aux lacunes qui existent dans celle-ci, car la couche de germanium "P" constituant la base, est très fine et les probabilités de rencontre entre électrons et lacunes sont faibles, à cause des petites dimensions des électrons.
- 3- La résistance d'entrée du transistor est faible par rapport à celle du tube électronique (qui est pratiquement infinie) parce que les quelques électrons qui traversent la base, provenant de l'émetteur, se combinent avec les lacunes qui existent, provoquant un appel de courant de la batterie qui polarise l'émetteur par rapport à la base.

- 4- Le courant entre émetteur et collecteur est constitué par des électrons libres dans le transistor du type "NPN" et par des lacunes dans le transistor "PNP".
- 5- Dans le transistor à pointe, le courant entre la base et le collecteur est plus grand que celui entre l'émetteur et la base, car les lacunes, qui vont de l'émetteur au collecteur, créent une charge d'espace positive attirant les électrons de la base (germanium "N"); ces électrons prennent de la vitesse et vont tomber sur le collecteur en augmentant le courant.

EXERCICE DE REVISION SUR LA 4ème LECON TRANSISTORS.

- 1- Quelle est la résistivité du germanium et du silicium pur ?
Quelle est celle du germanium et du silicium employés dans les transistors après l'opération de purification.
- 2- Comment obtient-on une jonction "P N" ?
- 3- Quels sont les avantages du transistor au silicium par rapport à celui au germanium ?
- 4- Qu'est-ce que le procédé dit du "pulling" ?
- 5- Qu'est-ce que la purification par zones et dans quel but l'effectue-t-on ?
