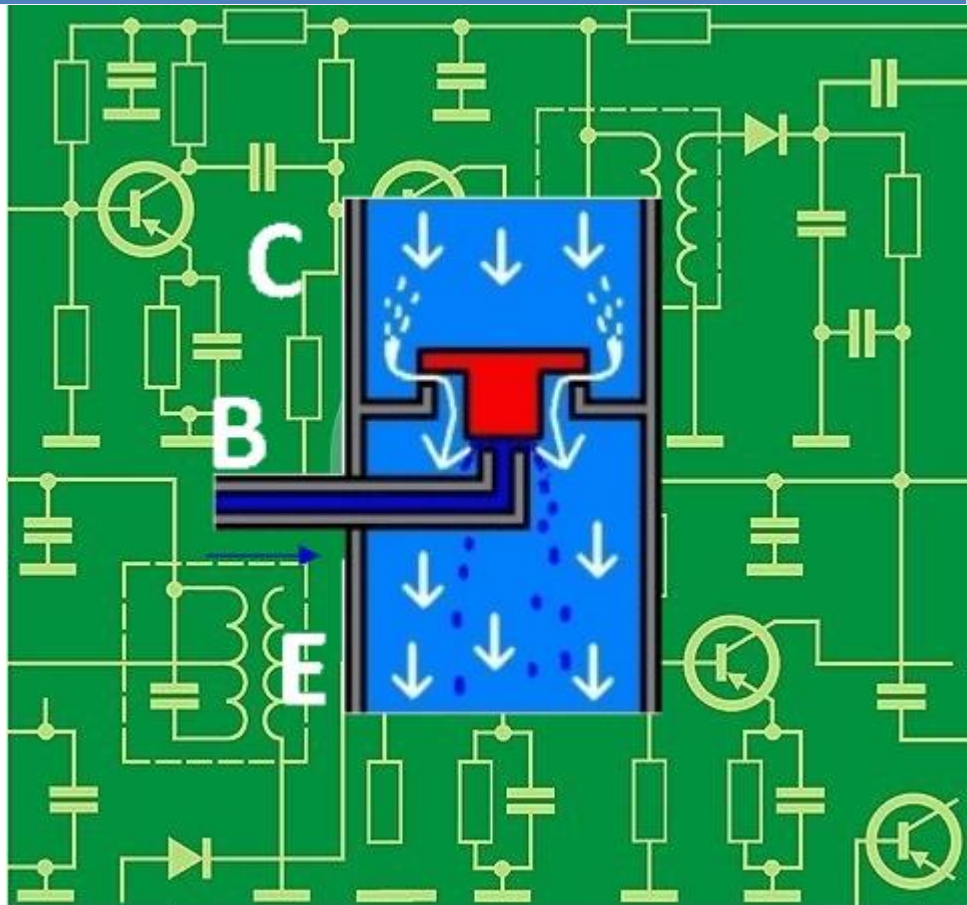


Le transistor

Principes fondamentaux



Pierre Marie GAYRAL

F5XG

04/05/2016

Le transistor

Principes fondamentaux

Contenu

Un peu d'histoire.....	2
Tension, Courant, Résistance	2
Résistance variable	2
Le brevet.....	2
Analogie hydraulique du fonctionnement du transistor.....	2
La jonction PN – semi-conducteur	3
Principe du transistor	3
Qualité des matériaux	4
Montages fondamentaux du transistor bipolaire[3].....	4
Montage émetteur commun.....	5
Montage base commune	5
Montage collecteur commun	5
Stabilité en température	6
Polarisation des transistors et stabilisation en courant.....	6
Stabilisation par polarisation base - émetteur.....	6
Stabilisation par résistance d'émetteur	6
Stabilisation par d'autres artifices.....	7
Le transistor à effet de champ (Field Effect Transistor)	8
Analogie hydraulique du FET.....	8
Principe de fonctionnement du FET	8
Montages fondamentaux du transistor JFET	8
Mode Source Commune (SC ou CS)	8
Mode Grille (<i>Gate</i>) Commune (GC ou CG)	9
Mode Drain Commun (DC ou CD).....	9
Types de transistors	9
Résumé.....	9
Annexe 1.....	10
Annexe 2.....	11
Mise en évidence du n° 14 : le cristal de silicium, quatre atomes de valence.....	11
Littérature.....	11

Le transistor

Principes fondamentaux

Un peu d'histoire

Il est admis que le transistor a été inventé en décembre 1947 dans les laboratoires de *Bell Laboratories* à Murray Hill N.J. USA, où il a été présenté pour la 1^{ère} fois.

Les scientifiques qui ont découvert l'effet transistor sont John Bardeen, William Bradford Shockley et Walter Houser Brattain qui faisaient partie d'une équipe de recherche sous la direction de John Robinson Pierce. Ceux-ci ont obtenu le prix Nobel pour cette découverte. [2]

Néanmoins il apparaît que Greenhalf Whitter Pickard, Oskar Keil, Ferdinand Braun, Walter Schottky, Julius Edgar Lilienfeld (entre-autres) aient publié des travaux décrivant le phénomène de résistance variable bien avant cette « invention »... [2]

Tension, Courant, Résistance

Georg Simon Ohm a démontré qu'il existait une constante proportionnelle directe entre le courant, la tension et la résistance d'un conducteur traversé par une source électrique.

D'où la loi d'Ohm dont la paternité lui revient : $R = \frac{U}{I}$

Résistance variable

Ferdinand Braun a déposé un brevet en 1874 où il démontre l'effet de redressement d'un semi-conducteur et de la possible variation de résistance.

Le 30 août 1906 il a déposé un brevet sur la diode à pointe en cristal de silicium.

En 1930 Walter Schottky a décrit exactement la théorie de la diode semi conductrice.

Le brevet

Qui a été créé en premier l'œuf ou la poule ... ?

Il reste que le brevet de la découverte est attribué aux scientifiques des laboratoires *Bell*. [2]

Analogie hydraulique du fonctionnement du transistor

Imaginons un réservoir **CBE** séparé par une cloison constituée par la soupape en rouge dans la Figure 1 Analogie hydraulique.

Au repos le liquide ne s'écoule pas de **C** vers **E** : la soupape ferme le système.

Une faible pression injectée sur **Base** (I_B) soulève la soupape, le liquide contenu dans le réservoir Collecteur (I_C) va s'écouler en grande quantité vers le réservoir Emetteur.

Il y a augmentation du débit de liquide de **C** vers **E** en fonction du déplacement β (béta) de la soupape dû à la force appliquée sur celle-ci.

Dans le réservoir **E** on retrouve la somme des débits $I_B + I_C$.

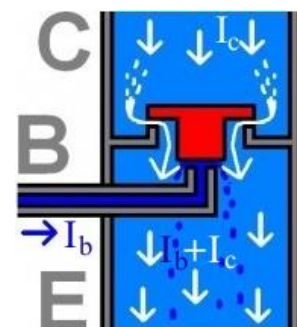


Figure 1 Analogie hydraulique

Le transistor

Principes fondamentaux

La jonction PN – semi-conducteur

L'effet de semi-conduction se produit dans un monocristal (silicium par ex., voir : *Annexe 1*) dopé différemment dans deux régions, l'une en manque d'électrons (P = positive) et l'autre d'électrons en surplus (N = négative).

La région de transition graduelle est une jonction PN (Voir Figure 2 Jonction PN [1]).

Une jonction est une région de faible épaisseur d'un monocristal, dans laquelle la conductibilité passe graduellement du type P au type N. [1]

Des additions (dopage) au bain peuvent modifier en cours de fabrication par tirage le type de conductibilité du cristal

Une jonction s'obtient pratiquement par :

- alliage (voir : *Annexe 1*)
- diffusion : Le cristal est porté à haute température dans un gaz qui lui fournit l'impureté voulue.
- épitaxie (voir : *Figure 3 Épitaxie d'un substrat*).

L'épitaxie est une étape technologique consistant à faire croître du cristal sur du cristal.

Étymologiquement, "épi" signifie "sur" et "taxis", "arrangement".

La technique va donc consister à utiliser le substrat comme germe cristallin de croissance et à faire croître la couche par un apport d'éléments constituant la nouvelle couche.

La couche « épitaxiée » peut être dopée ou non dopée. [5]

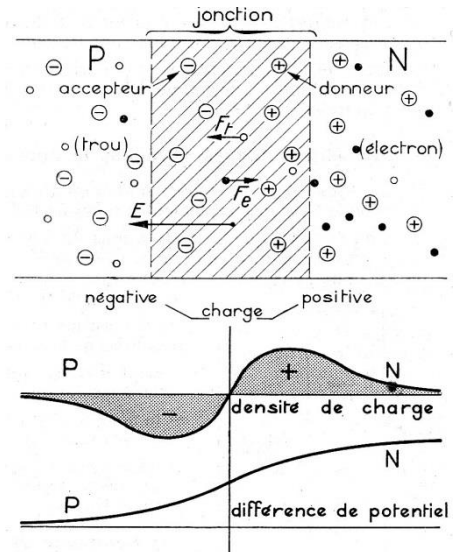


Figure 2 Jonction PN [1]

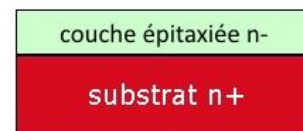


Figure 3 Épitaxie d'un substrat

Revenons à la Figure 2 Jonction PN [1], partie supérieure

La jonction se comporte comme un diélectrique du fait du champ E qui repousse les porteurs.

Une jonction constitue une soupape dont le sens correspond à la diffusion spontanée des électrons de la région **N** vers la région **P** et des trous en sens inverse. Le sens conventionnel du courant direct est dirigé de P vers N à travers la jonction. [1]

Principe du transistor

« Transistor » est un raccourci de « **trans**fer » et « **resistor** » : résistance de transfert.

Un transistor est composé de trois liaisons reposant sur l'effet semi-conducteur décrit par Ferdinand Braun (voir ci-dessus : Résistance variable

Il y a trois couches respectivement: [n-, p+, n-]. ou [p+, n-, p+].

D'où les types :

- NPN
- PNP

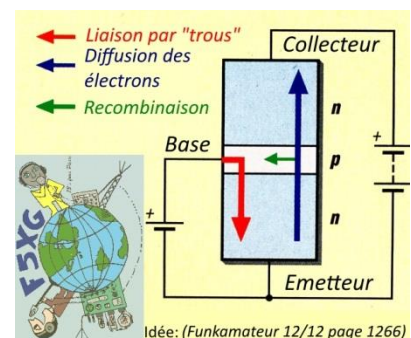
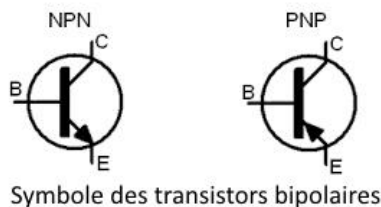


Figure 4 Fonctionnement d'un transistor NPN

Le transistor

Principes fondamentaux

Lorsque l'on applique une tension positive sur la base du transistor NPN représenté sur la Figure 4 Fonctionnement d'un transistor NPN, une conduction PN est établie. Il y a une liaison par trous.

La jonction Base-Emetteur devient plus «étroite», (Figure 5 Jonction Base-Émetteur conductrice), il a excès d'électrons dans l'émetteur.

Il existe une forte différence de potentiel entre émetteur et collecteur, les électrons se « précipitent » vers le collecteur et un courant plus élevé s'établit par diffusion.

Plus le (faible) courant de base I_B s'élève et plus il y aura de diffusion d'électrons, donc d'amplification par courant.

Une faible variation du courant de base entraîne une grande variation du courant entre émetteur et collecteur. L'amplification dans un montage à transistor est déterminée par le produit [gain en courant β (béta) * courant base I_B], le courant collecteur I_C sera proportionnel à celui-ci d'où : $I_C = \beta * I_B$

C'est cela le grand secret du transistor !

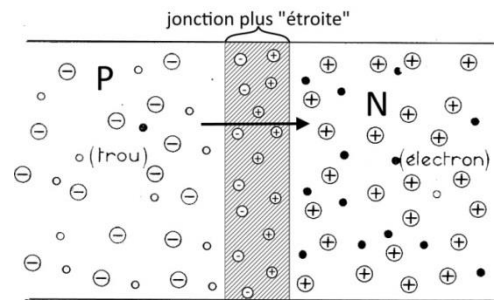


Figure 5 Jonction Base-Émetteur conductrice

Qualité des matériaux

Nous avons vu précédemment qu'un des cristaux de base est le silicium. (Voir : Figure 19 Tableau de Mendeleïev

On constate que sur cette table qu'il y quatre électrons de valence et que c'est un cristal stable, ... à l'état pur !!

Le silicium se trouve en abondance sur notre planète terre, mais il n'est pas pur.

Différents traitements devront être mis en œuvre pour le rendre pur à 100%, c.à.d. sans impuretés dans sa composition cristalline, comme aurait dit Monsieur de La Palisse.

Et tout cela pour ensuite ajouter d'autres atomes soit d'antimoine ou d'indium, afin de constituer les deux jonctions pour trois connexions : Base – Émetteur – Collecteur.

Différents procédés de fabrication d'un transistor, un des plus usuels est la structure Mesa.

La structure Mesa consiste à construire différentes couches les unes au-dessus des autres, avec des dimensions différentes pour « réaliser » des jonctions et des liaisons de celles-ci par soudage de fils dirigés (sortants) vers l'extérieur du boîtier constituant la protection de cet ensemble.

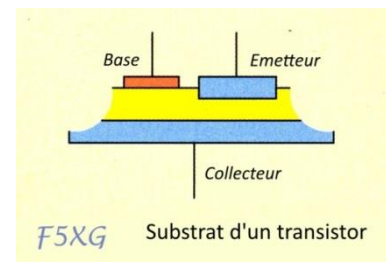


Figure 6 Transistor Mesa

Montages fondamentaux du transistor bipolaire[3]

De ce que nous venons d'apprendre ci-dessus, il existe des transistors PNP et NPN.

Leur cristal peut être du germanium ou du silicium. (Il existe d'autres possibilités et structures non évoquées dans ce document).

Dans ce qui suit est abordé le transistor NPN au silicium.

Le principe de base d'un amplificateur se ramène toujours à un quadripôle (Figure 7 Le quadripôle)

Ceci implique deux connexions d'entrée et également deux connexions de sortie. (Figure 7 Le quadripôle).

Le quadripôle a toujours une résistance d'entrée R_{in} aux bornes de laquelle est appliquée la tension d'entrée U_E . Pour la sortie c'est U_S qui apparaît aux bornes de la résistance de sortie R_{out} .

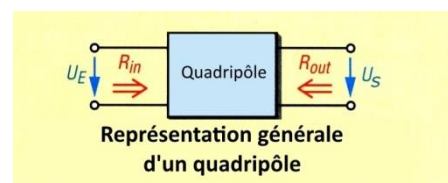


Figure 7 Le quadripôle

Le transistor

Principes fondamentaux

Un transistor ne possède que trois connexions (Base-Émetteur-Collecteur), donc il nous faut une liaison commune pour l'entrée et la sortie.

Les montages fondamentaux ci-après montrent comment on amplifie suivant différentes configurations un signal au moyen d'un transistor.

Montage émetteur commun

Le signal à amplifier est appliqué entre la base et l'émetteur. Ce signal amplifié se trouvera entre l'émetteur et le collecteur. La base est polarisée et présente une résistance d'entrée R_B . Lorsque la tension d'entrée U_E appliquée sur la base augmente, la tension de sortie U_S diminue aux bornes de R_{ch} . Il y a donc inversion de phase de 180° . Le gain est assez à très élevé. Les résistances d'entrée et de sortie sont de l'ordre de quelque centaine d'ohm à quelque kilo ohm.

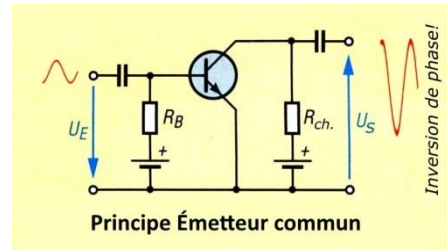


Figure 8 Montage émetteur commun

Montage base commune

Dans ce montage le signal U_E à amplifier est appliqué entre l'émetteur et la base. La base est polarisée par une tension négative appliquée à l'émetteur et présente une résistance d'entrée R_E . Le signal de sortie U_S se trouvera entre le collecteur et la base aux bornes de R_{ch} . Il n'y a pas d'inversion de phase dans cette configuration. Ce montage présente un gain élevé en tension. Le gain en courant est inférieur à un. L'avantage de ce montage est qu'il y a une très forte isolation entrée/sortie. Ce montage est utilisé en inter-étages pour des liaisons BF ou HF.

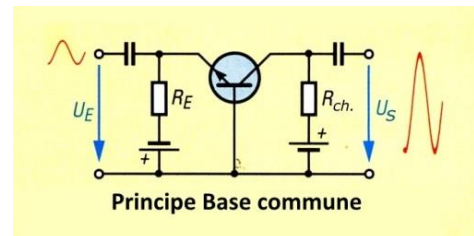


Figure 9 Montage base commune

Montage collecteur commun

Dans ce montage le signal U_E à amplifier est appliqué entre l'émetteur et le collecteur. Le signal amplifié U_S se trouvera entre l'émetteur et le collecteur aux bornes de R_{ch} . La résistance de charge R_{ch} est également la résistance d'émetteur. Il n'y a pas d'inversion de phase dans cette configuration. Ce montage présente un gain faible en tension inférieur à l'unité. Le gain en courant est très élevé. En conséquence l'amplification est élevée. Ce type de montage est utilisé en convertisseur d'impédance, son impédance d'entrée étant relativement élevée tandis que celle de sortie est assez basse.

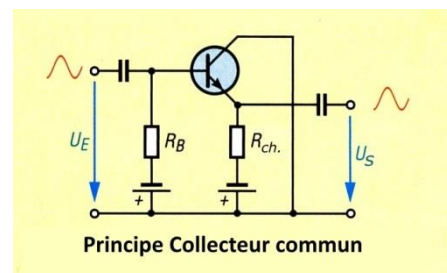


Figure 10 Montage collecteur commun

Le transistor

Principes fondamentaux

Stabilité en température

Le transistor est sensible aux influences de la température. Si l'on ne prend pas de précaution(s) il peut y avoir un emballement thermique entraînant la destruction systématique du transistor et également des éléments utilisés pour son fonctionnement.

Pour des transistors de puissance les constructeurs donnent la résistance thermique du boîtier et donnent également la température de la « puce » (le substrat) constituant le transistor.

Il faut tenir compte du courant consommé, de la dissipation du radiateur (refroidisseur) dans les conditions d'utilisation maximum utilisables.

Ces systèmes amplificateurs à transistor doivent être conçus pour ne pas provoquer cet emballement thermique.

Malgré tout, les transistors sont utilisables en toute sécurité, à condition de stabiliser le courant collecteur

Polarisation des transistors et stabilisation en courant

Le courant résiduel collecteur croît rapidement en fonction de la température :

- ambiante
- de la jonction thermique du collecteur
- du courant résiduel de collecteur

Stabilisation par polarisation base - émetteur

La résistance R_B fournit le courant base I_B , pris sur la résistance de collecteur R_C .

R_C est traversée par la somme du courant collecteur I_C et du courant base I_B .

Pour simplifier si le courant de collecteur I_C augmente, le courant base I_B va diminuer.

Et on a vu que $I_C = \beta * I_B$, d'où l'effet de stabilisation du courant collecteur, puisque I_B diminue.
c.q.f.d.

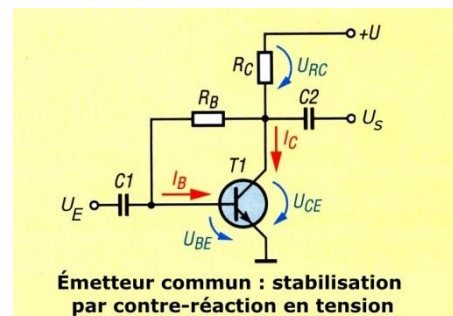


Figure 11 Stabilisation par polarisation Base-Collecteur

Stabilisation par résistance d'émetteur

Ce montage est plus performant que le précédent.

Si I_C augmente, U_{BE} diminue et également I_B . ceci s'oppose à l'augmentation d' I_C .

Le pont de polarisation de base constitué de R_{B1} ainsi que R_{B2} fixe le point de fonctionnement avec R_E .

Il faut qu' U_{BE} puisse varier, donc que le potentiel de base reste fixe pour permettre à I_C également de varier.

Il est même possible de cumuler deux effets, c.à.d. de relier R_{B1} à R_C comme sur la Figure 11 Stabilisation par polarisation Base-Collecteur

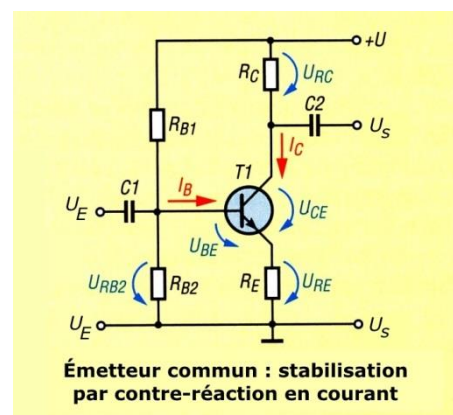


Figure 12 Stabilisation par résistance d'émetteur

Le transistor

Principes fondamentaux

Stabilisation par d'autres artifices

- par thermistance
- par refroidissement forcé (effet Peltier, etc.)
- régulation de température, etc. etc.

Le transistor

Principes fondamentaux

Le transistor à effet de champ (Field Effect Transistor)

Analogie hydraulique du FET

Imaginons un tuyau en caoutchouc dont on pince l'écoulement de maximum à aucun (voir Figure 13 Analogie hydraulique du FET).

Au repos le liquide ne s'écoule pas de **D** vers **S** : par défaut le pincement exercé par **G** est maximum : le système est fermé.

Un faible relâchement de la pression sur **Gate** (I_g) libère le pincement, le liquide venant de **Drain** (I_D) va s'écouler en plus grande quantité vers la sortie **Source**.

Il y a augmentation du débit de liquide de **D** vers **S** en fonction du pincement (U_G) appliqué sur la **Gate**.

A la sortie **Source** on retrouve le débit I_D .

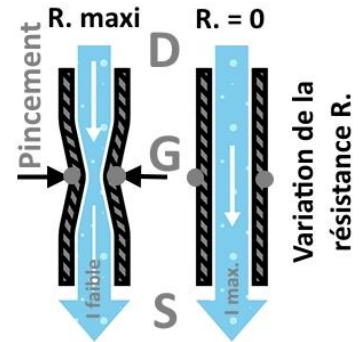


Figure 13 Analogie hydraulique du FET

Principe de fonctionnement du FET

Le transistor à effet de champ, ou FET utilise simplement la tension appliquée (dite de pincement) à sa borne d'entrée **Gate**, la porte pour contrôler le courant qui le traverse. (voir Figure 14 Constitution et schéma du JFET)

Le résultat est que le courant de sortie sera proportionnel à la tension d'entrée appliquée à la porte (**Gate**).

Le fonctionnement repose sur un champ électrique (d'où le nom d'effet de champ) généré par la tension d'entrée sur porte.

Le transistor à effet de champ, (*Angl. : Field Effect Transistor*) est un dispositif commandé par une **TENSION**.

On dénomme exactement le FET par Jonction FET : **JFET**

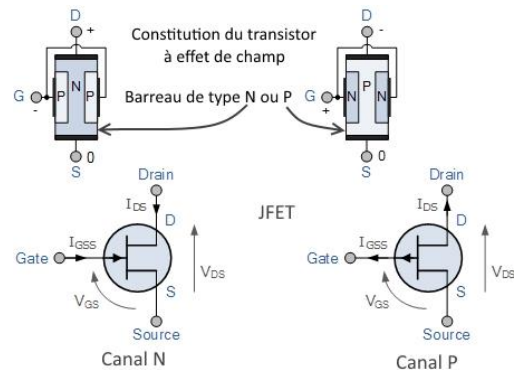


Figure 14 Constitution et schéma du JFET [6]

Montages fondamentaux du transistor JFET [6]

Comme le transistor à jonction bipolaire, le transistor à effet de champ est un dispositif à trois connexions.

Rappelons-nous que le FET doit être ramené à un quadripôle, voir Figure 7 Le quadripôle.

Trois modes de fonctionnement fondamentaux distincts peuvent être utilisés.

Mode Source Commune (SC ou CS)

Dans le mode en source commune (similaire à émetteur commun), le signal d'entrée est appliqué à la porte et sa sortie est disponible sur le drain voir Figure 15 Mode Source Commune.

Ce mode de fonctionnement du JFET est le plus courant en raison de son impédance d'entrée élevée et d'une bonne amplification en tension.

La sortie est déphasée par rapport à celle d'entrée.

L'amplificateur en source commune est très largement utilisé.

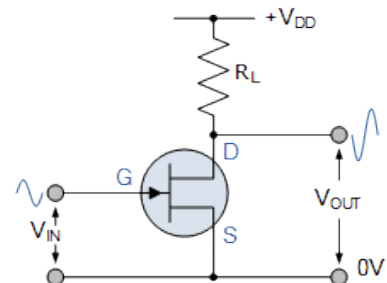


Figure 15 Mode Source Commune

Le transistor

Principes fondamentaux

Mode Grille (*Gate*) Commune (GC ou CG)

Dans le mode en grille commune (similaire au mode base commune), le signal d'entrée est appliqué à la source et la sortie est prélevée sur le drain.

La grille est reliée directement à la masse (0V), voir Figure 16 Mode Grille Commune.

Dans cette configuration en grille commune l'impédance d'entrée est faible, mais l'impédance de sortie est élevée.

Ce mode peut être utilisé dans des circuits haute fréquence ou bien pour des adaptations d'impédance ayant une faible impédance d'entrée devant être adaptée à une impédance de sortie élevée.

La sortie est "en phase" avec l'entrée.

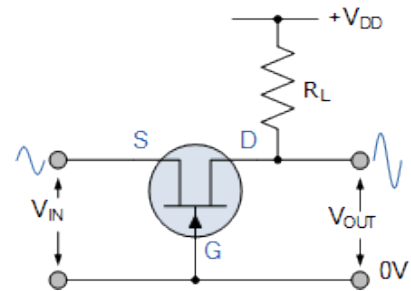


Figure 16 Mode Grille Commune

Mode Drain Commun (DC ou CD)

Dans le mode en drain commun (similaire à collecteur commun), le signal d'entrée est appliqué à la porte et la sortie est prélevée sur la source. Voir Figure 17 Mode Drain Commun.

Le mode en drain commun ou la configuration en "source suiveuse" a une impédance d'entrée élevée et une faible impédance de sortie.

Le gain de tension est « quasi-unité » et sera utilisé dans les amplificateurs tampons.

Le gain en tension de cette configuration en "source suiveuse" est légèrement inférieur à l'unité.

Le signal de sortie est « en phase », avec le signal d'entrée.

Ce type de configuration est appelée « drain commun » parce qu'il n'y a pas de signal disponible sur le drain, la tension présente, + VDD fournit juste la polarisation.

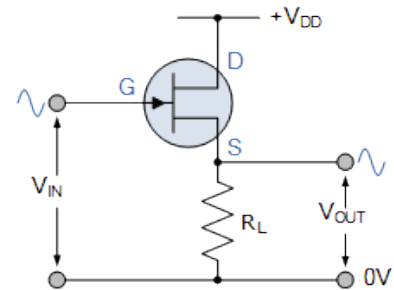


Figure 17 Mode Drain Commun

Types de transistors

Il existe une multitude de transistors (ou de montages de transistors):

- | Transistor | Dérivés du principe |
|----------------------|-------------------------|
| - montage Darlington | - Triacs |
| - uni jonction | - Thyristor |
| - phototransistor | - Commutation rapide |
| - à effet de champ | - J'en oublie bien sûr. |
| o mono grille | - Etc. |
| o bigrille | |
| - MOSFETs | |
| - RF de puissance | |

Résumé

Ce document n'est pas exhaustif, loin s'en faut, mais permettra de mieux appréhender le fonctionnement du transistor bipolaire et JFET.

B. — Diodes à cristaux

On distingue les diodes à jonction et les diodes à pointe. *Applications* : redressement, détection, régulation (diodes Zéner), commutation, circuits logiques.

I. — DIODES A JONCTION

Les diodes à jonction utilisent un monocristal de germanium ou de silicium ; la jonction peut être obtenue *par alliage* ou *par diffusion*.

a) Fabrication d'une diode à jonction par alliage.

Nous prendrons comme exemple une diode au germanium.

— Préparation du cristal de germanium.

On prépare du *germanium* très pur ($\rho = 20$ à $30 \Omega\text{cm}$) ; on fait fondre, on ajoute de l'*antimoine* et on tire le monocristal de germanium *N* ($\rho = 10$ à $20 \Omega\text{cm}$).

On débite le monocristal à la scie diamantée, en tablettes de 2 mm d'épaisseur ; un *traitement de surface* élimine les couches d'atomes perturbées afin d'obtenir pour les porteurs minoritaires une durée de vie d'au moins 100 microsecondes (1).

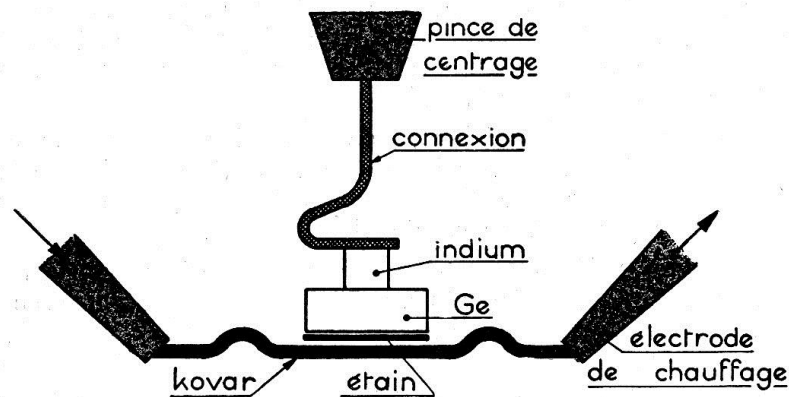


FIG. 4. — Obtention d'une diode à jonction.

(kovar : fer $\simeq 54$ % ; Ni : 29 % ; Co : 17 % ; Mn : 0,3 % ; résistivité $\simeq 50 \mu\Omega\text{cm}$; soudable aux verres ; coefficient de dilatation égal à celui du germanium).

— Obtention de la jonction PN.

On emploie l'indium pour transformer une partie du cristal en germanium *P*. A cet effet (fig. 4) on empile sur un support en kovar : une rondelle d'étain, la tablette de germanium, l'indium ($\sim 1 \text{ mm}^3$) et la connexion supérieure ; on chauffe électriquement en atmosphère contrôlée (inerte) entre 550° et 700°C pendant quelques instants.

(1) Le découpage au diamant oblige à enlever ensuite une épaisseur de 0,1 à 0,2 mm. D'autres procédés conduisent à des pertes plus faibles (découpage par de très fines lames d'acier en présence d'un abrasif, découpage électrolytique, découpage par magnétostriction, par ultrasons).

Figure 18 : Obtention d'une diode à jonction [1]

Le transistor Principes fondamentaux

Annexe 2

Tableau de Mendeleïev

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 H Hydrogène 1	2 He Hélium 0															2 He Hélium 0	
3 Li Lithium 1	4 Be Béryllium 2	14 Si Silicium 28,085 [Ne] 3s ² 3p ²															10 Ne Neon 0
11 Na Sodium 1	12 Mg Magnésium 2															18 Ar Argon 0	
19 K Potassium 1	20 Ca Calcium 2	21 Sc Scandium 3	22 Ti Titane 4	23 V Vanadium 5	24 Cr Chrome 6	25 Mn Manganèse 7	26 Fe Fer 8	27 Co Cobalt 9	28 Ni Nickel 10	29 Cu Cuivre 11	30 Zn Zinc 12	31 Ga Gallium 13	32 Ge Germanium 14	33 As Arsenic 15	34 Se Sélénium 16	35 Br Brome 17	36 Kr Krypton 0
37 Rb Rubidium 1	38 Sr Strontium 2	39 Y Yttrium 3	40 Zr Zirconium 4	41 Nb Niobium 5	42 Mo Molybdène 6	43 Tc Technétium 7	44 Ru Ruthénium 8	45 Rh Rhodium 9	46 Pd Palladium 10	47 Ag Argent 11	48 Cd Cadmium 12	49 In Indium 13	50 Sn Étain 14	51 Sb Antimoine 15	52 Te Tellure 16	53 I Iode 17	54 Xe Xénon 0
55 Cs Césium 1	56 Ba Baryum 2	57-71 Lanthanides	72 Hf Hafnium 4	73 Ta Tantalum 5	74 W Tungstène 6	75 Re Rhenium 7	76 Os Osmium 8	77 Ir Iridium 9	78 Pt Platine 10	79 Au Or 11	80 Hg Mercure 12	81 Tl Thallium 13	82 Pb Plomb 14	83 Bi Bismuth 15	84 Po Polonium 16	85 At Astatine 17	86 Rn Radon 0
87 Fr Francium 1	88 Ra Radium 2	89-103 Actinides	104 Rf Rutherfordium 4	105 Db Dubnium 5	106 Sg Seaborgium 6	107 Bh Bohrium 7	108 Hs Hassium 8	109 Mt Meitnerium 9	110 Ds Darmstadtium 10	111 Rg Roentgenium 11	112 Cn Copernicium 12	113 Uut Ununtrium 13	114 Fl Flerovium 14	115 Uup Ununpentium 15	116 Lv Livermorium 16	117 Uus Ununseptium 17	118 Uuo Ununoctium 0

Maximum valences are based on the oxidation states shown in the Orbitals tab.

57 La Lanthane 3	58 Ce Cérium 3	59 Pr Praseodyme 3	60 Nd Néodyme 3	61 Pm Prométhium 3	62 Sm Samarium 3	63 Eu Europium 3	64 Gd Gadolinium 3	65 Tb Terbium 3	66 Dy Dysprosium 3	67 Ho Holmium 3	68 Er Erbium 3	69 Tm Thulium 3	70 Yb Ytterbium 3	71 Lu Lutécium 3
89 Ac Actinium 3	90 Th Thorium 4	91 Pa Protactinium 3	92 U Uranium 4	93 Np Neptunium 3	94 Pu Plutonium 4	95 Am Américium 3	96 Cm Curium 4	97 Bk Berkélium 4	98 Cf Californium 4	99 Es Einsteinium 4	100 Fm Fermium 4	101 Md Mendélium 4	102 No Nobélium 4	103 Lr Lawrencium 4

Figure 19 Tableau de Mendeleïev

Mise en évidence du n° 14 : le cristal de silicium, quatre atomes de valence.

Littérature

- [1] : M. MOUNIC Semiconducteurs 1^{ère} Partie Ed. Foucher
- [2] : Funkamateur 12/12 Dr. Ing. Reinhard HENNIG – DD6AE
- [3] : Funkamateur 8/15 Dr. Ing. Klaus SANDER
- [4] : Pierre Marie GAYRAL F5XG
- [5] : http://www.microelectronique.univ-rennes1.fr/fr/index_chap4.htm
- [6] : <http://www.electronics-tutorials.ws/sitemap>