

Les transistors à effet de champ

I - Introduction

Dispositif semi-conducteur à deux jonctions mis au point, en 1948, par trois chercheurs [John Bardeen, William B. Shockley et Walter H. Brattain, auxquels on décerna le prix Nobel de physique en 1956], le transistor est à la base du formidable développement de l'électronique et des disciplines connexes [informatique, micro-électronique]. Associé à d'autres composants, il permet de réaliser les fonctions essentielles de l'électronique que sont la génération de signaux, l'amplification, la modulation-démodulation, la commutation, les circuits logiques...

Les deux types principaux de transistors utilisés aujourd'hui sont les *transistors bipolaires* [transistors NPN et PNP], et les *transistors à effet de champ* [TEC en abrégé]. Nous allons décrire à travers ce cours les deux catégories de TEC existantes : le TEC à *jonction* [appelé aussi J-TEC] et le TEC à *grille isolée* [appelé aussi MOS-TEC ou Transistor MOS].

II - Transistor à effet de champ à jonction

2 - 1 - Description

Sur un TEC canal N, une tension positive V_{DS} appliquée entre drain et source provoque la circulation d'un courant d'électrons dans le canal. Une tension négative appliquée entre la grille et la source crée une zone de charge d'espace, ou zone de déplétion, qui module la conductivité du canal.

[Voir le réseaux de caractéristiques]

À tension V_{GS} nulle, on constate que le courant croît avec V_{DS} jusqu'à une valeur limite V_P dite de *pincement* pour laquelle les zones de charges d'espace des deux jonctions grille-canal se rejoignent pratiquement. Au-delà apparaît un phénomène de limitation du courant [la résistance du canal et la tension V_{DS} variant sensiblement dans les mêmes proportions]. Lorsque la grille est polarisée négativement, cette limitation est obtenue pour une valeur plus faible de V_{DS} . On distingue deux zones; en premier lieu, une zone ohmique où le transistor se comporte comme une résistance variable, commandée par la tension de la grille suivant la loi approximative:

$$r_{DS} = \frac{r_0}{1 - \sqrt{\frac{V_{GS}}{-V_P}}},$$

où r_0 varie de quelques ohms à quelques centaines d'ohms, selon la géométrie du composant; en second lieu une zone de pincement, pour laquelle I_D vaut environ:

$$I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{-V_P}\right)^2,$$

qui permet un fonctionnement linéaire comparable à celui des transistors bipolaires (I_{DSS} est la valeur de I_{DS} quand $V_{GS} = 0$).

2 - 2 - Domaines d'utilisation

La forte impédance d'entrée des TEC [plusieurs dizaines, voire centaines de mégohms] associée à un faible bruit propre rend ces transistors particulièrement bien adaptés à l'amplification des faibles signaux sous forte impédance.

En commutation, ils présentent par rapport aux transistors bipolaires certains avantages, comme un gain en puissance plus élevé et une impédance d'entrée aux faibles fréquences beaucoup plus forte, ce qui permet de réaliser de grandes constantes de temps avec des capacités assez faibles [réalisation de monostables ou d'astables].

III - Transistor à effet de champ à grille isolée

Dans ce type de transistor, la grille [électrode constituée d'une couche d'aluminium ou de silicium polycristallin] est isolée du canal par une couche de silice SiO_2 . Le canal peut exister en l'absence de polarisation de grille [canal diffusé] ou être induit par action électrostatique, dès que la tension grille-source V_{GS} dépasse un certain seuil. On parle respectivement de MOS à appauvrissement ou de MOS à enrichissement. En effet, dans ce second cas, le transistor est bloqué en l'absence de polarisation de grille [$I_{DSS} = 0$], mais si, dans le cas d'un substrat de type P, une tension positive V_{GS} est appliquée, les électrons sont attirés vers l'interface Si-SiO₂, et, au-delà d'une valeur V_{GS} dite de seuil, il y a apparition d'un canal N qui autorise le passage d'un courant entre drain et source: le canal est créé en enrichissant la zone superficielle. Pour les transistors à appauvrissement, un canal préexiste [$I_{DSS} \neq 0$], mais, selon la polarisation de grille, il peut être appauvri [$V_{GS} < 0$] ou enrichi [$V_{GS} > 0$].

Les caractéristiques statiques ont la même allure que celles des TEC, et l'on retrouve les zones ohmique et de pincement. [Si l'on part d'un substrat de type N, on obtient un canal P, et les tensions appliquées sont de signe opposé par rapport au cas précédent.] La grille étant isolée, la résistance d'entrée du transistor MOS est très élevée [de $10^{11} \Omega$ à $10^{15} \Omega$], et, la capacité grille-source étant très faible, ces transistors sont extrêmement sensibles aux charges électrostatiques qui peuvent provoquer le claquage de la couche de silice. Il faut donc intégrer des dispositifs de protection contre les surtensions [le plus souvent, deux diodes tête-bêche placées entre grille et source]. En raison de leurs très petites dimensions, de leur faible consommation et de leur facilité d'intégration, le domaine privilégié d'emploi des transistors MOS est celui des circuits intégrés [mémoires, microprocesseurs, circuits logiques].

Certes, ces dispositifs sont encore moins rapides que les circuits correspondants à transistors bipolaires, mais des progrès spectaculaires ont été effectués. On assiste en effet à une formidable compétition technique entre les deux types de composants au niveau de la rapidité, de la puissance dissipée, de la densité d'intégration, de la fiabilité, par exemple le transistor à effet de champ en arséniure de gallium-aluminium.

Les transistors de type VMOS [à grille particulière en forme de V] permettent par exemple des applications de puissance [plusieurs dizaines de watts] jusqu'à des fréquences très élevées [plusieurs milliers de mégahertz]. Les autres structures MOS que l'on trouve sont les suivantes: CMOS [complémentaires], COSMOS [complémentaires symétriques], MNOS [metal nitride oxide semiconductor, où une couche de nitrure de silicium est intercalée entre l'aluminium et la silice], SOS [silicon on sapphire, où le substrat est en saphir artificiel]. Il faudrait parler des transistors à «gaz d'électrons» ou à haute mobilité [H.E.M.T.] avec l'utilisation de l'arséniure de gallium.