

mise au point sur les — TRANSISTORS

PARAMÈTRES ET CARACTÉRISTIQUES ESSENTIELLES DES T.E.C. ET DES M.O.S.

(Suite voir N° 1503)

3.3 EXAMEN DES COURANTS

3.3-1 GENERALITES

L'HABITUDE s'est imposée dans le domaine des semi-conducteurs de parler de champs E et de densités de courant j, plutôt que de tensions V et d'intensités I. Cette manière de procéder se justifie par le fait qu'elle permet de ne pas tenir compte des dimensions des volumes où les processus se déroulent. En effet, un **champ E**, nous ne l'ignorons plus, est une grandeur telle qu'une tension, en volts [V], se trouve rapportée à une distance d, en mètres [m] :

$$E = \frac{V}{d} \quad [\text{V/m}]$$

Une densité de courant j est une intensité I circulant au travers d'une surface S, mesurée en unité d'aire, soit, dans le système M.K.S.A., en mètres carrés [m²] :

$$j = \frac{I}{S} \quad [\text{A/m}^2]$$

Un **volume unitaire** s'appelle une **cellule**. Elle se mesure en [m³], ou en sous-multiples bien sûr.

Nous allons écrire la loi d'Ohm sous une forme moins habituelle que :

$$U = R.I.$$

en décomposant R :

$$U = \rho . l . \frac{1}{S} . I$$

et en posant :

$$\frac{U}{l} = E = \rho . \frac{I}{S} = \rho . j$$

donc :

$$E = \rho . j \text{ ou } j = \sigma . E$$

puisque :

$$\rho . \sigma = 1$$

La physique du solide traite, en conséquence des variations ($\pm \Delta j$) de la densité de courant, en fonction des variations du champ électrique ($\pm \Delta E$) et des variations de la conductivité ($\pm \Delta \sigma$). Si ces variations de grandeurs finies, mesurables, Δj , ΔE , $\Delta \sigma$, deviennent de plus en plus faibles, on les écrit dj, dE, d σ .

Dans le n° 1478 de cette revue, nous avons établi que :

$$j = k . n . q^2 . E$$

(voir paragraphe 2, page 241).

Le facteur k est le quotient de la **mobilité** μ des charges libres (ou « vitesse tangentielle »),

$$\mu = v_{tg} = \frac{v}{E} = \frac{v.l}{V}$$

avec v, vitesse de déplacement des corpuscules mobiles au sein du matériau) par la valeur de la

charge électrique élémentaire $\pm q$. Comme la mobilité μ est de la forme :

$$\mu = q . \frac{\tau}{m^*}$$

avec τ , temps de relaxation, ou durée de vie, des porteurs entre deux collisions et m^* (lire m étoilé) la « masse réelle » (dite aussi « effective ») de ces charges sous l'influence des nombreuses forces qui règnent dans le milieu cristallin (attraction, répulsion, capture, etc.) et y créent des **états énergétiques** particuliers.

Il vient :

$$k = \frac{\mu}{q} = \frac{q}{q} . \frac{\tau}{m^*} = \frac{\tau}{m^*}$$

ainsi k est-il un **facteur d'amortissement** (visco-élastique). Il s'ensuit que :

$$\sigma = n . q^2 . \frac{\tau}{m^*}$$

et comme deux types de porteurs différents co-existent dans le semi-conducteur, on a :

$$\sigma_n = n . q^2 . \frac{\tau_n}{m_n^*}$$

pour les électrons de densité volumique n (quantité de négatons par cellule du cristal) et

$$\sigma_p = p . q^2 . \frac{\tau_p}{m_p^*}$$

pour les trous de densité p.

Les quantités de particules négatives (n) et de trous (p) varient avec la température (repérée en degrés Kelvin absolus [°K]), donc :

$$n = n_0 + \Delta n f(T)$$

$$p = p_0 + \Delta p f(T)$$

d'où :

$$\sigma = \sigma_0 \pm \Delta \sigma = f(n, \mu_n, p, \mu_p, T, E)$$

La présence du champ E se justifiant surtout dans les comportements hyper-énergétisés. La température est aussi capable d'activer l'ionisation des impuretés (voir fig. A-4, p. 242 n° 1478).

Le courant global reflète les variations du nombre des porteurs générés par échauffement : $j \pm \Delta j = g(n_0 \pm \Delta n, p_0 \pm \Delta p)$

Les fonctions f et g ont été étudiées mais se révèlent peu intéressantes pour notre pratique aussi les passerons-nous sous silence.

Deux densités de courant dans les semi-conducteurs intrinsèques sont connues. L'une est relative aux négatons et se désigne par j_n , l'autre se rattache aux trous et s'écrit j_p ; en fonction du champ électrique E :

$$j_n(E) = q . \mu_n . n . E$$

$$j_p(E) = q . \mu_p . p . E$$

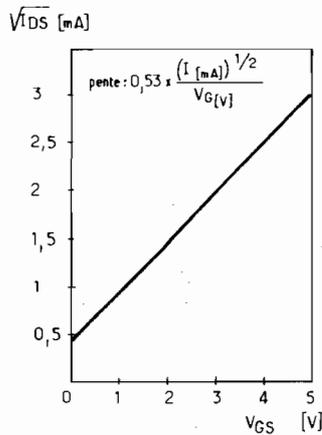


Fig. 3.3-1 : Variation de la racine carrée du courant de drain-source en fonction de la tension grille-source mettant en évidence la linéarité de la pente s (ou g selon les auteurs). Cette courbe a le mérite d'aider à la détermination de la mobilité des porteurs de charge.

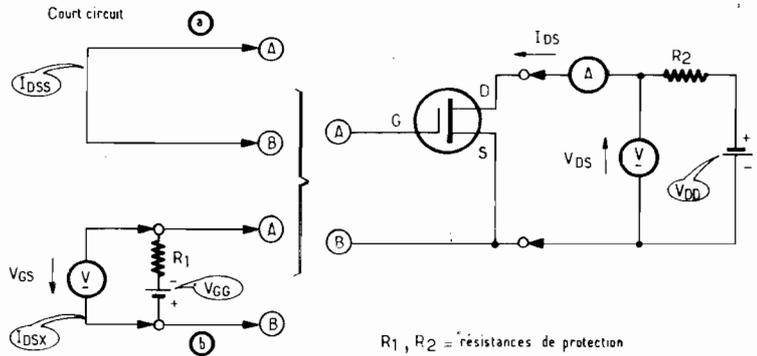


Fig. 3.3-2 : Mesures de I_{DSS} (a) et de I_{DSX} (b).

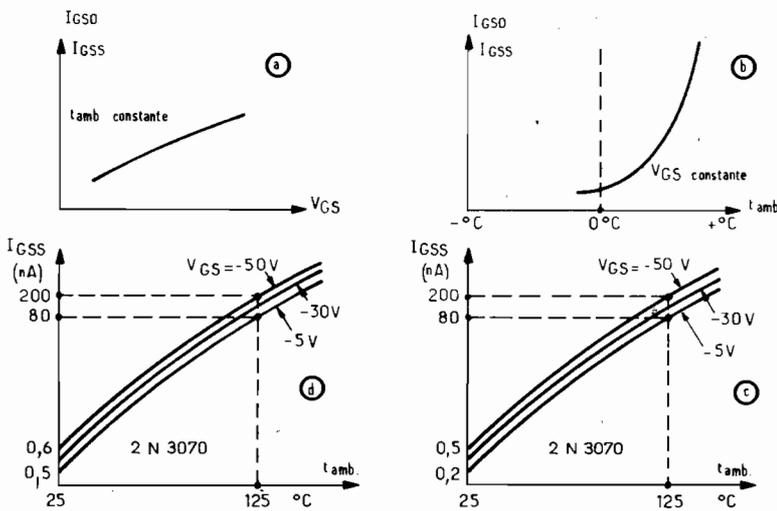


Fig. 3.3-4 : Variations de I_{GSS} en fonction de la tension V_{GS} , à température ambiante constante (a), puis à température variable, pour $V_{GS} = \text{constante}$ (b) et pour différentes valeurs de la tension grille-source (c); allure de la variation de $I_{GSS} = f(t_{amb})$ paramétré par diverses grandeurs de V_{GS} (d).

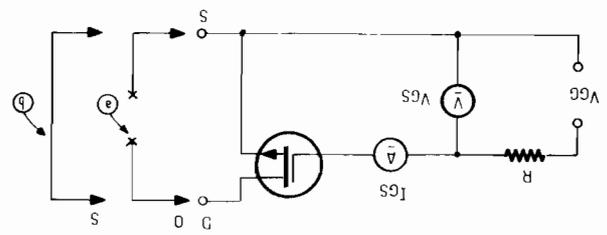


Fig. 3.3-3 : Mesures de I_{GSO} (a) et de I_{GSS} (b).

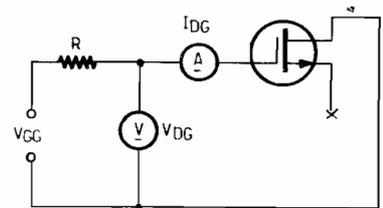


Fig. 3.3-5 : Schéma d'évaluation de I_{0GO} .

avec μ_n, μ_p , mobilités des charges négatives (n) et positives (p), dont les quantités dénombrées dans les cellules élémentaires concernées, sont, respectivement, n négatons et p trous. Ces quantités sont nommées densités des charges mobiles et ne doivent pas être confondues avec des densités de courant.

Comme le courant total est constitué par les deux flux de porteurs mobiles, sa densité j s'exprime par :

$$j = j_n + j_p = q \cdot \mu_n \cdot n \cdot E + q \cdot \mu_p \cdot p \cdot E = \sigma \cdot E$$

avec σ conductibilité intrinsèque du matériau (caractéristique propre du semi-conducteur non dopé).

La conductibilité extrinsèque σ^* (lire « sigma étoilé ») tient compte, pour sa part, du nombre

des atomes dopeurs N_d (pour les donneurs) N_a (pour les accepteurs) entraînant n (ou p) porteurs surnuméraires par leur ionisation.

Mais le champ électrique E n'est pas la seule force génératrice de courant. Il existe d'autres sources capables de déclencher un mouvement de charges mobiles, ne serait-ce que leur propre densité (ou concentration). Les charges, en s'accumulant, dans un volume trop restreint, ont tendance alors à se repousser mutuellement avec d'autant plus d'énergie qu'elles sont en surnombre. Elles se mettent alors à diffuser, d'elles-mêmes, dans les mailles cristallines. Leur aptitude à s'échapper ainsi est caractérisée par un facteur de diffusion D (ou diffusivité) différent pour les électrons D_n et pour les trous D_p . Einstein a montré que :

$$D_n = \frac{k.T}{q} \cdot \mu_n$$

et

$$D_p = \frac{k.T}{q} \cdot \mu_p$$

Nous avons trouvé pour l'expression de la densité de courant j (en $[A/m^2]$).

$$j(E) = \sigma \cdot E$$

il faut donc ajouter à cette conductibilité l'apport de la diffusion, dépendant des diffusivités D_n et D_p et des forces la mettant en œuvre, ou concentrations C_n et C_p des corpuscules n et p dans une cellule donnée. Ecrivons simplement que :

$$j(D) = j_{diffusion}$$

$$= \lambda (D_n, D_p, C_n, C_p) = \lambda (\text{dif.})$$

sans entrer dans le détail mathématique de cette relation (qui est, rappelons-le aux initiés, une différentielle).

Finalement, la densité totale de courant souvent nommée de manière impropre « courant » par abus de langage devient :

$$j_t = j(E) + j(D) = \sigma \cdot E + \lambda \cdot D = j$$

3.3-2 DONNEES PHYSIQUES

La mobilité des électrons dans un canal n est de la forme :

$$\mu_n = 56,6 \frac{L \cdot t_{ox} \cdot S^2}{e}$$

avec :

L = longueur du canal.

t_{ox} = épaisseur de la couche d'oxyde.

e = épaisseur du substrat.

S^2 = carré de la pente s, définie par la courbe $\sqrt{I_{DS}}$ en fonction de V_G (fig. 33-1) (voir § 3.7).

Si $V_D = +5 V$, $s = 0,53$, $L/e = 0,032$, $t_{ox} = 1\ 500 \text{ \AA}$ (150 [nm]), il vient :

$$\mu_n = 760 [\text{cm}^2]/[\text{V}\cdot\text{s}]$$

Dans le matériau semi-conducteur les porteurs ne circulent pas « à la vitesse de la lumière », contrairement à l'opinion habituelle. Au contraire, ils sont animés d'une « vitesse limite » v_L qui varie entre 10 000 et 100 000 [m/s] selon les procédés de fabrication retenus. Avouons que ce n'est déjà pas si mal, cependant, il

y a loin, de ces 40 000 à 400 000 [km-h], aux 300 000 [km/s] de la lumière. Mais les photons, ou « grains de lumière », à la fois, onde et corpuscule (dualité), n'ont pas de masse et se meuvent avec cette célérité c, dans un **espace libre**. Ce n'est pas le cas d'un **réseau cristallin**. La vitesse v_L change de grandeur avec la valeur de la résistivité :

$$\rho_1 = 10[\Omega\cdot\text{cm}],$$

$$v_{L1} = \frac{3}{2} \cdot 10^6 [\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}]$$

$$\rho_2 = 2[\Omega\cdot\text{cm}],$$

$$v_{L2} \approx 8 \cdot 10^6 [\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}]$$

pour du **silicium dopé N**. L'arséniure de gallium présente des trous de moindre vitesse ; pour eux, alors, v_L vaut environ 10^5 [cm.s⁻¹], ce qui est normal, l'inertie d'une « lacune d'électron » étant supérieure à celle de la particule (les masses apparentes m^* des électrons et des trous sont différentes : m^* est moins lourde que m_p^* ; de surcroît, certains trous, en se déplaçant ont une inertie qui augmente à cause des énergies de ralentissement qui leur sont imposées par la structure cristalline du matériau ; on parle alors de « trous lourds »).

3.3-3 PRINCIPAUX COURANTS DANS LES T.E.C. ET DANS LES M.O.S.T.

Le tableau V rassemble les définitions utiles à conserver.

Dans le cas des F.E.T., on peut, en première approximation, écrire que :

$$j = \sigma \cdot E$$

$$= \sigma (V_G, V_p, V(x), T) \cdot \frac{\Delta V}{\Delta e}$$

qui correspond à une densité ponctuelle (en fait à l'intérieur d'une cellule de dimensions res-

TABLEAU V
Intensités dans les T.E.C. et dans les M.O.S.T.

Symboles	Définitions	Symboles	Définitions
I_{DS}	Courant continu drain source, parfois noté I_D (T.E.C.)	I_{DDH}	Courant de l'alimentation V_{DD} par boîtier sortie à l'état haut
$I_{DS(S.T.E.C.)}$	Courant de drain en polarisation nulle, $V_{GS} = 0$, à V_{DS} spécifié par le constructeur $V_{DS\text{ sat}}$	I_{DDL}	Courant de l'alimentation V_{DD} par boîtier sortie à l'état bas
$I_{DS(sat)}$	Courant de drain à tension de saturation $V_{D\text{ sat}}$	I_{GG}	Courant de l'alimentation V_{GG} par boîtier
$I_{DS(on)}$	Courant de drain à l'état conducteur (circuit logique)	I_{GGH}	Courant de l'alimentation V_{GG} par boîtier sortie à l'état haut
$I_{DS(off)}$	Courant de drain à l'état bloqué (circuit logique)	I_{GGL}	Courant de l'alimentation V_{GG} par boîtier sortie à l'état bas
$I_{DSX(T.E.C.)}$	Courant résiduel de drain, avec V_{GSX} de blocage et V_{DS} spécifiées	I_{SS}	Courant d'alimentation substrat
I_{DSB}	Courant de fuite entre le drain et le substrat semi-conducteur	I_{QSB}	Courant de fuite horloge/substrat
I_{GS}	Courant continu grille source parfois noté I_G (T.E.C.)	I_I	Courant d'entrée ($I = \text{input}$)
I_{GSS}	Courant de fuite total de grille (d'un T.E.C.) avec $V_{DS} = 0$ et V_{GS} spécifié	I_{IH}	Courant d'entrée à V_{IH}
I_{GSO}	Courant de fuite de grille avec $I_S = 0$ et V_{GD} spécifié.	I_{IL}	Courant d'entrée à V_{IL}
I_{GSX}	Courant de fuite de grille à I_{GSS} nul	I_{ISB}	Courant de fuite entrée/substrat
I_{GSB}	Courant de fuite grille substrat	I_O	Courant de sortie
$I_{GS(off)}$	Courant d'écart I_e , à l'état logique bloqué, fuyant par la couche d'oxyde recouvrant la grille du T.E.C.	I_{OH}	Courant de sortie à V_{OH}
I_{GDO}	Courant de grille avec I_D nul et V_{GS} spécifié (T.E.C.)	I_{OHZ}	Courant maximal de sortie à l'état haute impédance
I_S	Courant de source	I_{OL}	Courant de sortie à V_{OL}
I_{DD}	Courant de l'alimentation V_{DD} par boîtier	I_{OS}	Courant de sortie en court-circuit
		I_{OSB}	Courant de fuite sortie/substrat

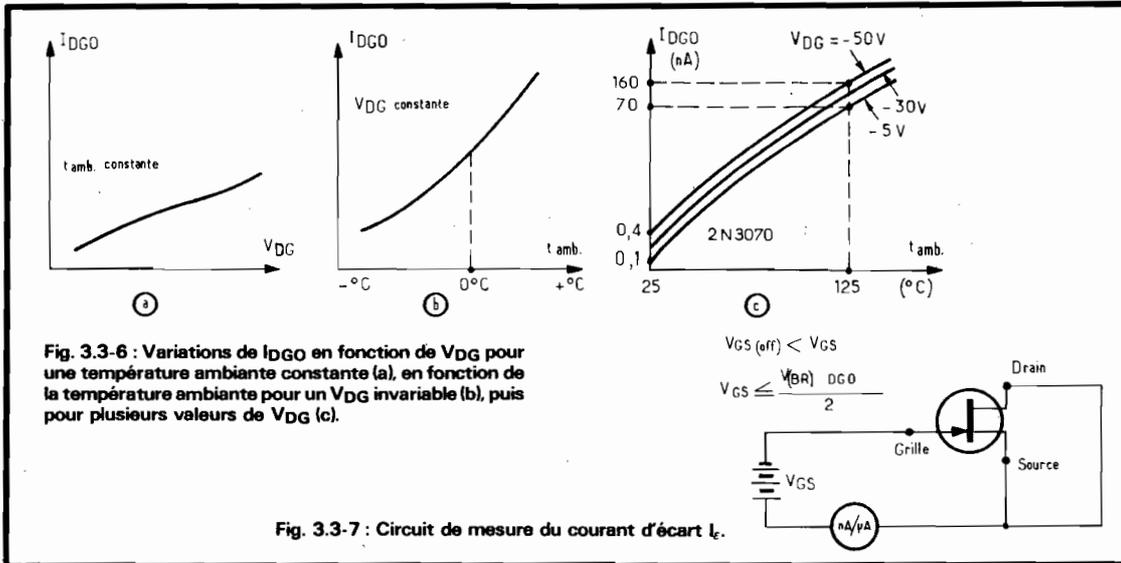


Fig. 3.3-6 : Variations de I_{DGO} en fonction de V_{DG} pour une température ambiante constante (a), en fonction de la température ambiante pour un V_{DG} invariable (b), puis pour plusieurs valeurs de V_{DG} (c).

Fig. 3.3-7 : Circuit de mesure du courant d'écart I_e .

treintes entourant un point volumique x, considéré comme seule concernée dans le canal).

Nous avons :

V_G = tension de grille ;

v_p = tension de pincement

$V(x)$ = tension au point x (isolé dans le canal)

T = température en [$^{\circ}K$] ;

$\Delta V = V_2 - V_1$ = d.d.p. entre l'entrée et la sortie de la cellule, fonction du potentiel interne (potentiel de Fermi, potentiel d'ionisation...).

$\Delta l = l_2 - l_1$ = distance intracellulaire, mesurée entre les deux faces traversées (approximativement de manière perpendiculaire) par les charges.

L'équation fondamentale décrivant le courant dans un canal M.O.S.T. a été établie par Sah. Le courant de drain I_{DS} s'écrit :

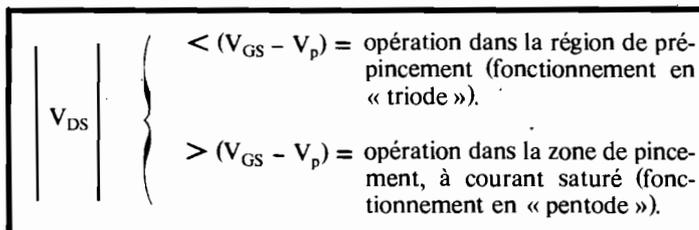
$$I_{DS} = K \cdot V_{DS} \left(V_{GS} - \frac{V_{DS}}{2} \right)$$

et le courant de saturation s'exprime par :

$$I_{DS(sat)} = K' \cdot V_{DS(sat)}^2$$

où $K' = 1/2 K$, constante du dispositif liée à la mobilité des porteurs, à l'épaisseur et à la longueur du canal, et au dopage des impuretés.

Nous observerons que :



3.3-4 MESURES DES COURANTS RESIDUELS DRAIN-SOURCE

Pour les T.E.C. à jonction du type striction, $1[mA] \ll I_{DSS} \ll 15[mA]$; pour un transistor à grille isolée, les catalogues indiquent $0,1 mA \ll I_{DSS} \ll 2,5 mA$ et $I_{DSX} \approx 1[\mu A]$; quant aux transistors à grille isolée, bi-mode (déplétion - enrichissement), ils affichent pour I_{DSS} des valeurs voisines de $10[nA]$. La figure 3.3-2 montre quel est le schéma de mesure à réaliser. Pour effectuer la mesure, il convient de glisser dans le circuit des résistances de protection R_1 (côté grille), R_2 (côté drain) et d'opérer comme suit (recommandations d'Arciszewski, voir bibliographie) :

- Régler les tensions des sources V_{GG} et V_{DD} au minimum.
- Placer le transistor dans le circuit de mesure.

Puis entreprendre :

- a) La mesure de I_{DSS} .
 - Brancher le dipôle S entre grille et source.
 - Augmenter progressivement V_{DD} jusqu'à ce que la tension V_{DS} spécifiée soit atteinte.
 - La lecture de l'ampèremètre correspond au courant I_{DSS} .
 Et achever par celle,
- b) de I_{DSX} .
 - Régler de nouveau V_{DD} au minimum.

- Brancher le dipôle X entre grille et source.

Régler V_{GG} pour obtenir la tension de blocage $-V_{GS}$ spécifiée.

- Augmenter V_{DD} pour obtenir la tension V_{DS} spécifiée.

- La lecture de l'ampèremètre I_D correspond à I_{DSX} .

3.3-5 MESURE DES COURANTS RESIDUELS GRILLE-SOURCE

Sachant que, d'une part :

3.3-5.1 I_{GSO} est le courant résiduel grille-source à une tension V_{GS} spécifiée, avec drain en circuit ouvert : $I_D = 0$.

et que d'autre part :

3.3-5.2 I_{GSS} est le courant résiduel grille-source à une tension V_{GS} spécifiée, avec drain et source en court-circuit : $V_{DS} = 0$.

On réalise le circuit de la figure 3.3-3, grâce auquel, on se rendra compte que pour des T.E.C. à jonction du type striction, on obtient :

$$I_{GSS} < -0,1 [nA]$$

avec $V_{GS} = -30 [V]$, V_{DS} étant nul.

En revanche pour des T.E.C. à G.I. à enrichissement-déplétion :

I_{GSS} est de l'ordre de quelques picoampères avec $V_{GS} = -10 V$ et $V_{DS} = 0$. Il en est de même avec les dispositifs à enrichissement.

Comme toujours une résistance de protection R est à brancher dans le circuit de source. Le processus de mesure est classique :

- Régler l'alimentation V_{GG} au minimum.
- Placer le transistor dans le support de mesure.
- Brancher le dipôle S ou O aux bornes D et S.

- Augmenter progressivement la tension de V_{GG} jusqu'à ce que V_{GS} spécifiée soit atteinte.

- La lecture de l'ampèremètre I_{GS} correspond à I_{GSS} ou à I_{GSO} selon le dipôle branché.

On obtient différentes courbes en variant les conditions expérimentales (fig. 3.3-4).

3.3-6 MESURE DU COURANT RESIDUEL DRAIN-GRILLE I_{DGO}

I_{DGO} est le courant résiduel drain-grille à une tension V_{DG} spécifiée, avec source en circuit ouvert $I_S = 0$.

Le montage est celui de la figure 3.3-5 qui requiert toujours l'insertion d'une résistance de protection R .

Le processus opératoire est le suivant :

- Régler la tension de la source V_{GG} au minimum.

- Placer le transistor dans le circuit de mesure.

- Augmenter progressivement V_{GG} pour obtenir la tension V_{DG} spécifiée.

- La lecture de l'ampèremètre I_{DG} correspond à I_{DGO} , qui aboutit à diverses courbes représentatives reproduites figure 3.3-6.

3.3-7 COURANT D'ECART A L'ETAT BLOQUE

Le courant d'écart apparaît dans l'état bloqué (OFF) du découpage et il est dû à une transmission parasite vers la sortie de la tension de commutation. Dans le cas d'un transistor bipolaire, le trajet d'une telle conduction est la diode collecteur-émetteur, polarisée dans le sens inverse. Elle peut fournir à $25^{\circ}C$, un courant parasite de $1 nA$ en présence d'un signal de commutation de $1 V$, mais ce courant subit une croissance exponentielle avec la température. Dans un transistor MOS, le trajet de cette conduction est seulement la couche d'oxyde de silicium. Pour toute fuite en surface, sur le substrat, le boîtier sert d'« anneau de garde » car il est relié au substrat et, normalement, à la source. Cette résistance de fuite peut avoir une valeur courante de $10^{12} \Omega$ et elle ne diminue pas notablement lorsque la température augmente.

On le mesure à l'aide du circuit présenté figure 3.3-7.