

## 1.8 TRANZISTORUL BIPOLAR CU POARTĂ IZOLATĂ (IGBT).

Tranzistoarele bipolare și *MOSFET* au, fiecare în parte, o serie de performanțe foarte avantajoase pentru aplicații, dar și unele dezavantaje care limitează dimensiunea aplicației.

Astfel tranzistorul bipolar în raport are avantajele:

- capacitate mai mare în curent și tensiune;
- cădere mică de tensiune în conducție,  $V_{CEON}$ .

Pe de altă parte dezavantajele mai importante sunt:

- timpi relativ mari de comutație;
- curent și putere de comandă mare;
- prezența saturației;
- pericolul de distrugere prin cea de a doua străpungere.

Tranzistorul *MOSFET* este avantajos din motivele:

- timpi mici de comutație;
- comandă în tensiune;
- inexistența saturației și a celei de a doua străpungeri ;
- capacitate relativ mică în tensiune și curent.

Îmbinarea avantajelor celor două tipuri de tiristoare s-a regăsit într-un nou dispozitiv semiconductor de putere numit tranzistor bipolar cu poartă izolată – *IGBT*.

### 1.8.1 STRUCTURĂ. POLARIZARE

O structură verticală printr-un *IGBT* cu canal *n* este prezentată în fig.1.91, iar în fig.1.92 simbolizarea acestuia. Straturile unui tranzistor *IGBT* sunt:

- stratul colectorului de tip  $p^+$ , înalt dopat,  $10^{19}/\text{cm}^3$ ;
- stratul de sărăcire de tip  $n^-$ , slab dopat,  $10^{14}/\text{cm}^3$ ;
- corpul  $p$ , mediu dopat,  $10^{17}/\text{cm}^3$ ;
- stratul emitorului  $n_2^+$ , înalt dopat,  $10^{19}/\text{cm}^3$ .

Suplimentar la unele tranzistoare se mai găsește și stratul tampon  $n_1^+$ , înalt dopat  $10^{19}/\text{cm}^3$ .

Dacă tranzistorul nu are stratul tampon se numește *IGBT* simetric, în caz contrar

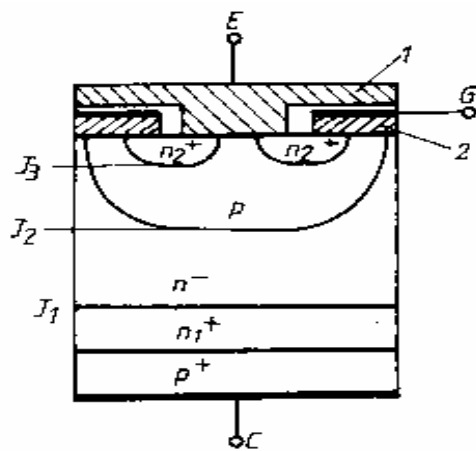


Fig.1.91 Structură.

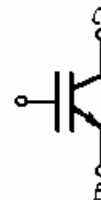


Fig.1.92 Simbolul IGBT-ului cu canal *n*.

asimetric. Emitorul tranzistorului se conectează la stratul  $n_2^+$  prin intermediul metalizării 1, din aluminiu. Metalizarea porții  $G$  este separată de corpul  $p$  prin stratul de oxid de siliciu, 2.

Pentru analiza polarizării se consideră poarta izolată. Polarizarea directă constă în aplicarea polarității plus pe colectorul  $C$  al tranzistorului. Este polarizată invers doar joncțiunea  $J_2$ , bariera de potențial extinzându-se în toată grosimea stratului  $n^-$ ,  $IGBT$ -ul putând susține tensiuni de până la 1500 ... 2500V. În cazul polarizării inverse, minusul pe colector, există diferențe între tranzistorul simetric și asimetric. Astfel pentru tranzistorul asimetric, fig.1.91, sunt polarizate invers joncțiunile  $J_1$  și  $J_3$ . Fiind joncțiuni de tip  $n^+p$ , respectiv  $n^+p^+$ , barierele de potențial sunt reduse, iar capacitatea în tensiune inversă de ordinul zecilor de volți. În cazul tranzistorului simetric, lipsind stratul  $n_1^+$ , joncțiunea  $J_1$  este formată din straturile  $n^-p^+$ , bariera de potențial fiind de același ordin de mărime ca la polarizarea directă. Așadar tranzistorul simetric poate funcționa alimentat atât în c.c. cât și în c.a., în timp ce tranzistorul asimetric poate funcționa alimentat numai alimentat cu tensiune continuă și polarizare directă. Se realizează foarte rar  $IGBT$ -uri cu canal de tip  $p$ , structura fiind asemănătoare, tipul straturilor și polarizarea inversate.

### 1.8.2 FUNCȚIONARE. CARACTERISTICA STATICĂ.

Stare de conducție a unui  $IGBT$  se realizează dacă este polarizat ca în fig.1.93. Producători de  $IGBT$ -uri furnizează mai multe tipuri de scheme echivalente funcționale, care permit descrierea conducției în tranzistor. O astfel de schemă echivalentă simplificată este prezentată în fig.1.94, unde  $IGBT$ -ul este înlocuit printr-un tranzistor  $MOSFET$  cu canal  $n$  și un tranzistor bipolar  $pnp$ . Rezistorul  $R_n^{-1}$  materializează rezistența stratului  $n^-$ . Tranzistorul  $MOSFET$  reprezintă partea de comandă a  $IGBT$ -ului care este similară cu cea a tranzistorului  $MOSFET$ , în sensul că în corpul  $p$  se creează, prin câmp electric, canalul de tip  $n$ . Prin acest canal electronii injectați din sursă, polarizată negativ, se regăsesc în dren, iar prin stratul  $n^-$  în baza tranzistorului  $pnp$ , comandând intrarea rapidă în conducție a acestuia. Blocarea tranzistorului  $pnp$  se face prin blocarea conducției  $MOSFET$ -ului. În felul acesta se realizează comanda în tensiune, deci de putere mică, și timpi de comutație reduși.

Se evită de asemenea fenomenul saturației, comanda pe poartă  $IGBT$ -ului fiind în câmp electric. Pe de altă parte prezența între colector și emitor a tranzistorului  $pnp$  asigură o cădere de tensiune  $V_{CEON}$  comparabilă cu cea de la tranzistoarele bipolare. Caracteristicile statice,  $i_c = f(V_{CE})$ , au forma din fig.1.95 și se analizează împreună cu caracteristica de transfer  $i_c = f(V_{GE})$  din fig.1.96. În familia de caracteristici statice se definesc zonele:

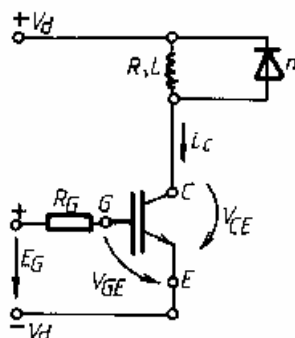


Fig.1.93 Schema de funcționare.

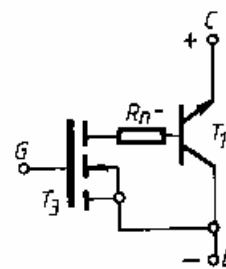


Fig.1.94 Schema echivalentă.

- dreapta  $V_{CESUS}$ , care limitează tensiunea maxim admisă în sens direct, la valori mai mari decât  $V_{CESUS}$  apărând fenomenul primei străpungeri, cu aceleași caracteristici ca la tranzistoarele bipolare;
- zona activă, cu aceleași proprietăți ca la  $MOSFET$ ;

- zona ohmică;
  - pentru tranzistoarele simetrice tensiunea  $V_{BR}$ , de prăbușire în sens invers.
- Caracteristica de transfer are exact aceleași proprietăți ca la tranzistorul *MOSFET*.

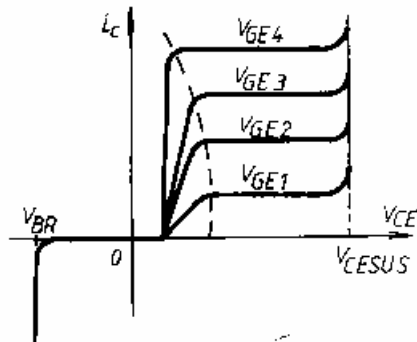


Fig.1.95 Caracteristica statică.

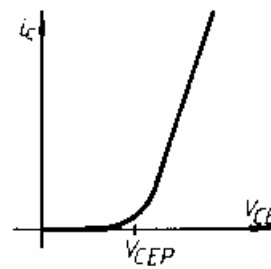


Fig.1.96 Caracteristica de transfer.

Stabilirea punctului de funcționare se face tot ca la tranzistorul *MOSFET*, în sensul îndeplinirii condițiilor:

- să asigure la curent maxim, tensiune  $V_{CEON}$  minimă, punctul de funcționare plasându-se pe curba de separație între zonele activă și ohmică;
- punctul de funcționare să se găsească în interiorul ariei de funcționare sigură, *SOA*, de formă asemănătoare cu cea de la *MOSFET*.

Tensiunea  $V_{CEON}$ , care caracterizează *IGBT*-ul, are valori între 1,9 ... 2,9V. Calculul regimului termic urmează aceeași metodologie de la tranzistorului *MOSFET*.

### 1.8.3 AUTOAMORSAREA.

Structura *IGBT*-ului este practic de tipul *pnpn*, identică cu a unui tiristor obișnuit. Din acest motiv *IGBT*-ul este suspect de apariția fenomenului de autoamorsare, după modelul de la tiristorul obișnuit. În mod normal curentul de colector se închide între stratul de colector  $p^+$  și stratul de emitor  $n^+$ , traversând corpul  $p$ . Acest curent este desenat cu linie continuă în fig.1.97. Pentru a se evita efectele nedorite ce apar la *MOSFET*, metalizarea emitorului acoperă parțial corpul tranzistorului. Astfel poate să apară așa numitul curent lateral,  $i_L$ , desenat cu linie întreruptă, direct între colector și emitor, fără traversarea stratului  $n_2^+$ . Se pune astfel în evidență

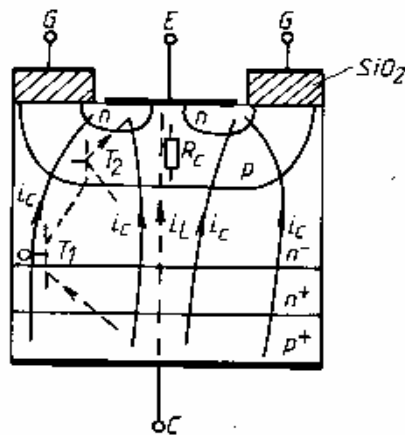


Fig.1.97 Autoamorsarea.

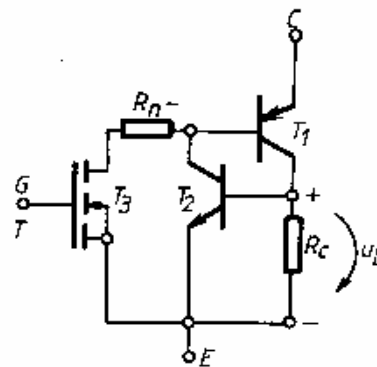


Fig.1.98 Schema echivalentă completă.

tranzistorul,  $T_2$ , de tip  $n\text{pn}$ , format din straturile  $n^+pn_2^+$ , care completează schema echivalentă simplificată din fig.1.94, după schema din fig.1.98. Acest tranzistor are între bază și emitor rezistorul  $R_c$ , care corespunde rezistenței corpului  $p$ . Închiderea curentului lateral,  $i_L$ , prin corp produce căderea de tensiune  $u_L$ , cu polaritatea plus pe bază, proporțională cu acest curent. Când curentul de colector este relativ mare curentul lateral  $i_L$  capătă valori apreciabile. Tensiunea  $u_L$  din baza tranzistorului  $T_2$  devine suficient de mare încât tranzistoarele  $T_1$  și  $T_2$ , a căror schemă este identică cu a tiristorului obișnuit, intră în procesul de autoamorsare. Efectele autoamorsării conduc la:

- intrarea în saturație a celor două tranzistoare  $T_1$  și  $T_2$  însoțită de o creștere accentuată a curentului de colector și distrugerea IGBT-ului;
- imposibilitatea blocării conducerii prin comandă pe poartă, aceasta fiind dezactivată prin apariția autoamorsării;
- blocarea conducerii se mai poate realiza numai prin anularea curentului de colector, ca la tiristorul obișnuit.

Evitarea acestui fenomen se realizează în două moduri. Pentru structuri de tipul celei din fig.1.97 trebuie menținut curentul de colector

$$i_c \leq I_{CM} \quad (1.119)$$

unde  $I_{CM}$  este curentul maxim de colector admis de IGBT pentru care nu apare fenomenul autoamorsării.

A doua variantă constă în modificarea constructivă prezentată în fig.1.99. Evitarea autoamorsării constă în micșorarea tensiunii  $u_L$  prin reducerea rezistenței corpului  $R_c$ , în zona de închidere a curentului lateral. În acest sens corpul se realizează din două regiuni,  $p$  cu doparea de  $10^{17}/\text{cm}^3$  și  $p^+$  cu dopare  $10^{19}/\text{cm}^3$ . Pericolul apariției acestui fenomen este sporit în procesul de blocare, când ca urmare a curentului relativ mare și a tensiunii colector-emitor în creștere, tensiunea  $u_L$  scapă de sub control, IGBT-ul rămânând în conducție, deși comanda pe poartă este activată.

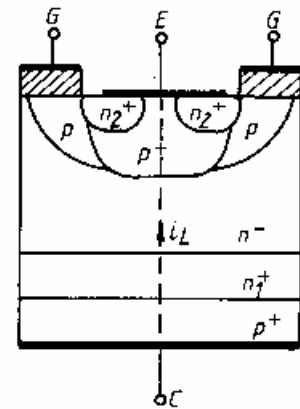


Fig.1.99 Structura pentru evitarea autoamorsării.

#### 1.8.4 CARACTERISTICI DINAMICE. CIRCUITE DE COMANDA PE POARTĂ.

Intrare și ieșire din conducție a IGBT-ului, având în vedere structura de comandă, este identică cu a MOSFET-ului, în sens că efectul capacităților parazite poartă-emitor,  $C_{GE}$ , și poartă-colector,  $C_{GC}$ , intervin în procesul de comutație în același mod ca și capacitățile  $C_{GD}$  și  $C_{GS}$ . Diferențele care apar constau în:

- timpi mai mari de intrare în conducție,  $t_{ON}$ , și ieșire din conducție  $t_{OFF}$ , valorile fiind de ordinul sutelor de nanosecunde;
- la începutul ieșirii din conducție, înaintea începerii scăderii curentului de colector, apare un vârf destul de însemnat al acestui curent, cauzat de începerea recombinării golurilor din stratul de colector;
- la tranzistorul asimetric prezența stratului tampon  $n_1^+$ , asigură o recombinare directă a golurilor din stratul de colector, reducând supracurentul și micșorând substanțial timpul de blocare  $t_{OFF}$ ;

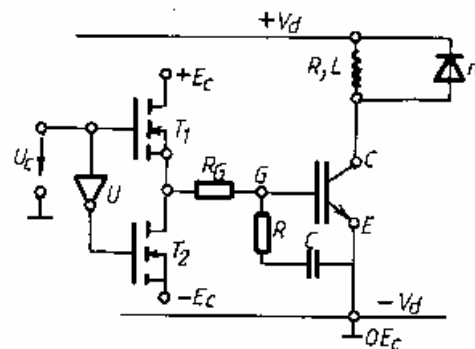


Fig.1.100 Circuit de comandă pe poartă.

- ca urmare a impedanței mari de intrare a circuitului de poartă pot să apară oscilații ale comenzii, motiv pentru care se introduc filtre pe semnalul de comandă, iar conexiunile circuitului de comandă se realizează cu lungime cât mai mică.

Un circuit tipic de comandă pe poartă, fig.1.100, este aproape identic cu cel de la *MOSFET*. Diferențele constau în:

- prezența filtrului *RC* pentru preîntâmpinarea oscilațiilor comenzii;
- polarizarea negativă la ieșirea din conducție cu scopul de a reduce vârful de curent de la începutul blocării.

Nivelul polarizării negative este de maxim 5V, nivel la care reducerea vârfului de curent este substanțială. Peste această valoare vârful de curent nu se mai micșorează. Se menționează că acest vârf de curent este suportat fără probleme de *IGBT*, reducerea lui fiind, cel mai adesea, solicitată de sarcină.

Similitudinea comenzii *IGBT*-urilor și *MOSFET*-urilor merge până la identitate, în sensul că se realizează drivere de poartă integrate cu utilizare pentru ambele tipuri de tranzistoare.

### 1.8.5 CIRCUITE DE PROTECȚIE.

Protecțiile necesare pentru un *IGBT* sunt aceleași de la *MOSFET* și se realizează în același mod. În privința protecției la supracurent, se menționează utilizarea numai a primei metode, ca urmare a faptului că nu se realizează *IGBT*-uri cu senzor de curent înglobat. O altă diferență constă în sensibilitatea *IGBT*-ului la gradient de tensiune  $dV_{CE}/dt$  la ieșirea din conducție. Astfel dacă gradientul este prea mare poate să apară fenomenul de autoamorsare. Producătorii indică o arie de operare sigură la polarizarea inversă a porții, *RBSOA*, fig 1.101, care limitează valorile curentului de colector  $i_C$ , în funcție de gradientul  $dV_{CE}/dt$ , pentru  $V_{GE} < 0$ .

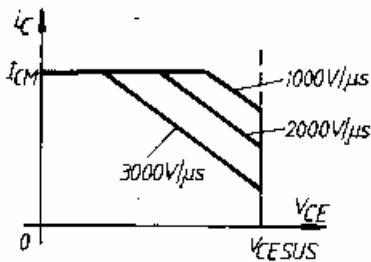


Fig.1.101 Aria de operare sigură *RBSOA*.

Oricum gradientul  $dV_{CE}/dt$  admis este mult mai mare față de celelalte semiconductoare de putere. Micșorarea gradientului  $dV_{CE}/dt$  se realizează, la fel ca la toate dispozitivele semiconductoare de putere, prin circuite *RC* în paralel colector-emitor, după modelul de la *MOSFET*. Având în vedere capacitatea mare în curent a *IGBT*-urilor, uneori se utilizează doar o capacitate în paralel cu circuitul colector-emitor.