

2.4 Tranzistoare cu efect de camp (TEC)

Clasificare si proprietati

Tranzistoarele cu efect de camp, prescurtat TEC sau FET dupa denumirea din engleza (Field Effect Transistor), se numesc astfel datorita principiului lor de functionare. Simplificat, la un TEC circulatia curentului principal se face printr-un canal a carui rezistenta este controlata de un camp electric.

TEC se mai numesc si tranzistoare unipolare deoarece curentul este produs de un singur fel de purtatori, fie goluri, fie electroni, care, functie de tipul tranzistorului, sunt purtatori majoritari.

Dupa tehnologia de realizare TEC se impart in doua mari familii:

1. TEC in tehnologie metal-oxid-semiconductor sau TEC-MOS (MOS-FET in literatura engleza);
2. TEC cu jonctiune sau TEC-J (J-FET in literatura engleza).

Campul care controleaza rezistenta canalului si implicit curentul este creat de o tensiune de comanda aplicata in spatiul de intrare al tranzistorului. Acest spatiu este reprezentat fie de un strat de material izolant (TEC-MOS), fie de o jonctiune polarizata invers izolant (TEC-J) si are o rezistenta electrica foarte mare (zeci-sute de $M\Omega$). In consecinta curentul de comanda este extrem de mic (nanoamperi). Curentul de comanda fiind foarte mic, puterea de comanda este deasemenea foarte mica si castigul de putere al tranzistorului este foarte mare. Sintetizand, proprietatile fundamentale ale tranzistoarelor MOS sunt:

- rezistenta foarte mare de intrare;
- castig de putere foarte mare.

Acestea sunt si doua avantaje ale TEC in comparatie cu tranzistoarele bipolare. Un alt avantaj: TEC au un volum de constructie mult mai mic ceea ce este important in realizarea circuitelor integrate. Valorile limita sunt insa mai mici decat la tranzistoarele bipolare.

2.4.1 TEC – MOS

Structura si principiul de functionare

Tranzistorul TEC-MOS are structura prezentata in figura 2.30a. Acesta este format dintr-un substrat de material semiconductor intrinsec sau impurificat, in cazul de fata un material de tip p . Zona centrala a suprafetei superioare a materialului este acoperita cu un subtire de oxid de siliciu care este un foarte bun izolant electric. Suprafata stratului de oxid este metalizata. Aceasta este structura Metal-Oxid-Semiconductor care da numele tranzistorului.

La marginile suprafeței de oxid, în baza de tip p sunt realizate două insule de material de tip n . Electrozii principali care se numesc Sursa și Drena sunt conectați la aceste insule. Electroful de comandă denumit Grila este conectat la suprafața metalică

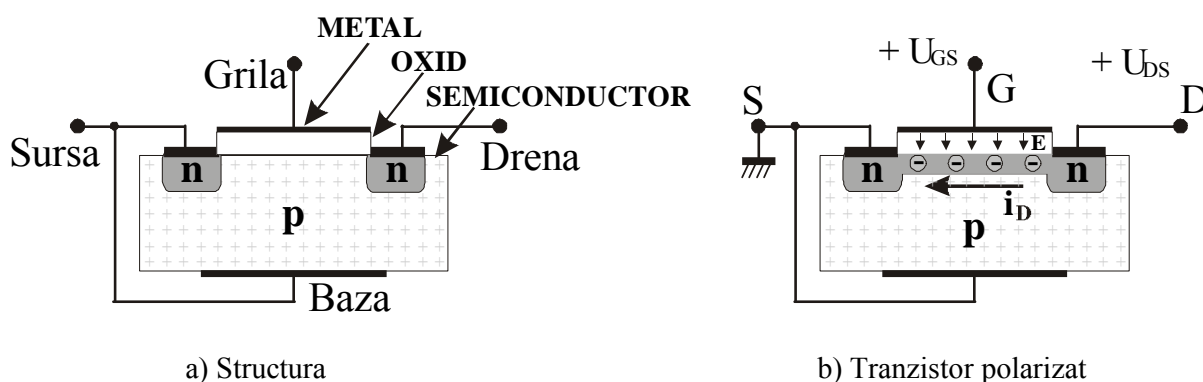


Fig. 2.30 Structura și principiul de funcționare al TEC-MOS

ce acoperă stratul izolant. Uneori este conectat la substrat și un al patrulea electrod, Baza, legat intern la sursă în marea majoritate a cazurilor.

Dacă grila nu este polarizată atunci între sursă și drenă sunt trei zone $n-p-n$ care sunt echivalente cu două diode puse la fel ca în figura 2.20 iar un curent între electrozii principali nu este posibil. Dacă însă Grila este polarizată cu o tensiune pozitivă $+U_{GS}$ (figura 2.30b) atunci întreaga tensiune se regăsește pe stratul izolant, subțire. În izolant se creează un câmp electric de intensitate ridicată, E , cu sensul din figura. Câmpul va împinge spre interior sarcinile majoritare pozitive și va atrage în apropierea suprafeței sarcinile negative. Se va forma (induce) un strat bun conductor de sarcini mobile negative numit strat de inversiune sau canal n . TEC-MOS în această variantă se mai numește și TEC-MOS cu canal indus. Dacă se aplică o tensiune între electrozii principali va apărea un curent prin canalul conductor. În mod obișnuit tensiunea este pozitivă $+U_{DS}$ ca în figura dar o tensiune de semn schimbat va produce un curent de sens opus. Lățimea canalului și în consecință și intensitatea curentului pot fi controlate prin modificarea câmpului E adică prin modificarea tensiunii de comandă U_{GS} .

Clasificare și simboluri

Variantă de tranzistor prezentată în secțiunea anterioară are denumirea completă TEC-MOS cu canal indus n . Ca și în cazul tranzistorului bipolar, există și varianta în care zonele de material semiconductor sunt de polaritate opusă și care se numește TEC-MOS cu canal indus p .

Dar mai există o altă variantă tehnologică, la care canalul conductor între zonele Sursă și Drenă este realizat din

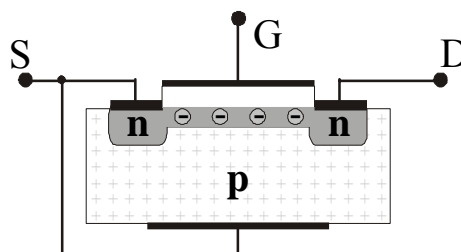


Fig. 2.31 Structura TEC-MOS cu canal inițial n .

constructie, tranzistorul fiind denumit TEC-MOS cu canal initial, figura 2.31.

Canalul cu purtatori n exista in absenta tensiunilor de polarizare si a campului electric in zona izolanta de oxid de siliciu. O tensiune aplicata intre sursa si drena va conduce la o circulatie de curent. Daca se aplica pe grila o tensiune u_{GS} pozitiva, canalul se largeste si curentul creste, daca se aplica pe grila o tensiune u_{GS} negativa, canalul se ingusteaza si curentul scade. La o anumita limita a tensiunii negative de comanda canalul se inchide si curentul se anuleaza.

Similar cazului TEC-MOS cu canal indus, si aici sunt variante cu canal initial n sau p .

Rezumand, TEC-MOS se clasifica dupa cum urmeaza:

TEC-MOS	cu canal indus	n
		p
TEC-MOS	cu canal initial	n
		p

Simbolurile pentru toate variantele de TEC-MOS sunt prezentate in figura 2.32

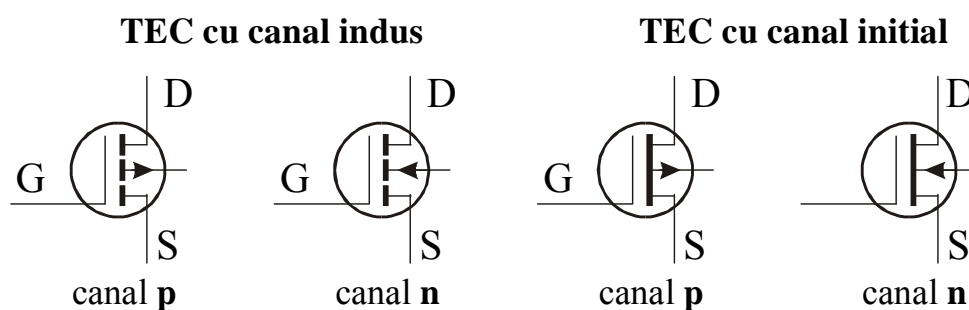


Fig. 2.32 Simbolurile TEC-MOS

Caracteristici grafice

Modul si zonele de functionare ale TEC-MOS pot fi cel mai bine urmarite pe caracteristicile sau familiile de caracteristici grafice. Cea mai importanta este familia

de caracteristici grafice de iesire, care leaga marimile de iesire si anume curentul de drena si tensiunea drena-sursa. Ca parametru este marimea de intrare, tensiunea grila-sursa.

Caracteristicile de iesire ale TEC-MOS cu canal indus n sunt prezentate in figura 2.33. Ele sunt desenate doar pentru modul de polarizare cel mai utilizat, cu tensiune pozitiva drena sursa. Trebuie mentionat ca, spre deosebire de tranzistorul bipolar, TEC-MOS poate functiona pentru ambele polaritati ale tensiunii de iesire drena-sursa.

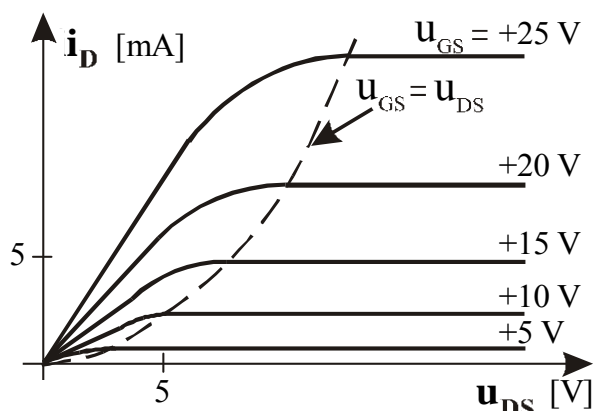


Fig. 2.33 Caracteristicile de iesire ale TEC-MOS cu canal indus

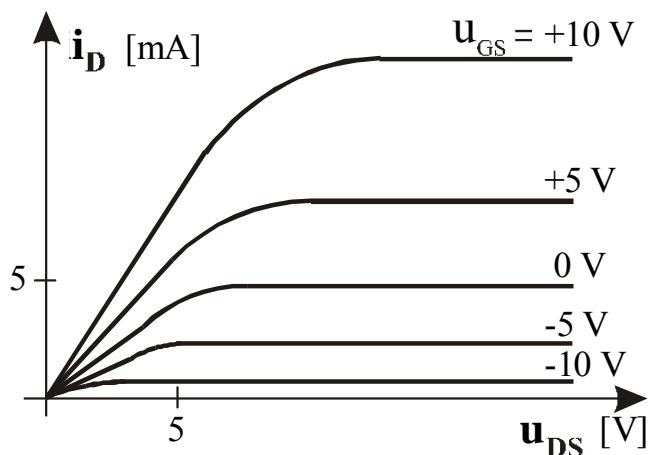


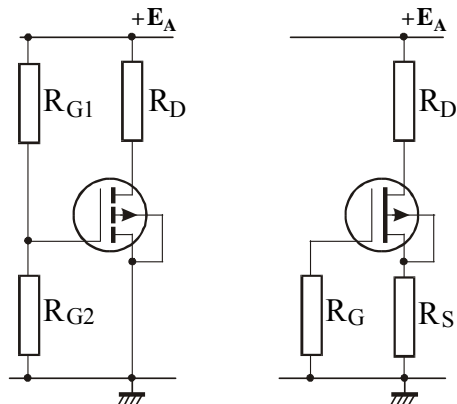
Fig. 2.34 Caracteristicile de iesire ale TEC-MOS cu

Daca tensiunea de comanda u_{GS} este zero sau negativa atunci i_D este zero si tranzistorul este blocat. Daca u_{GS} creste atunci se formeaza canalul conductor si odata cu polarizarea pozitiva drena-sursa apare un curent de drena.

La tensiuni mici de drena curentul creste liniar. Panta scestuia depinde de tensiunea de comanda u_{GS} . In zona liniara de variatie (zona care se intinde si la valori negative u_{DS}) tranzistorul se comporta ca o

rezistenta reglabila, comandata de u_{GS} .

Urmeaza o zona neliniara de trecere pana cind $u_{DS} = u_{GS}$, limita marcata prin linia punctata care delimiteaza intrarea intr-o noua zona liniara, denumita zona de saturatie cu o evolutie a curentului principal asemanatoare cu aceea de la tranzistoarele bipolare in zona de functionare activa. Curentul ramane constant o data cu cresterea in continuare a tensiunii u_{DS} . Dar spre deosebire de tranzistorul bipolar, curentul principal nu mai depinde liniar de marimea de comanda, u_{GS} in cazul de aici. Se observa ca la fiecare crestere de 5 Volți a tensiunii de comanda i_D are o crestere mai mare decat la pasul anterior.



a) cu canal indus b) cu canal initial

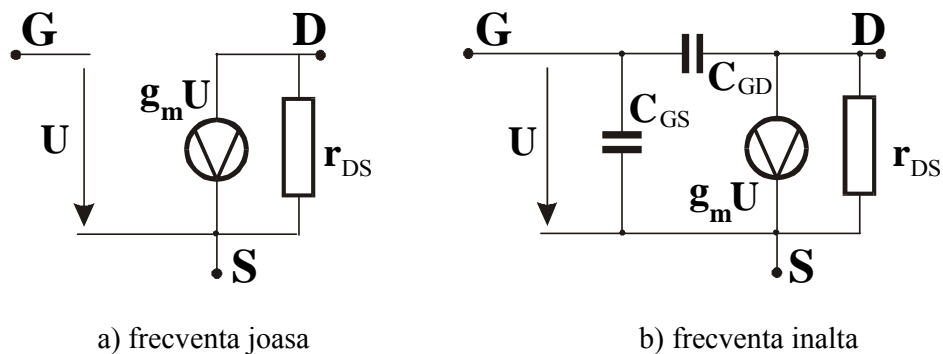
Fig. 2.35 Circuite de polarizare ale TEC-MOS

In cazul tranzistorului MOS cu canal initial caracteristicile de iesire au aceeasi forma ca in cazul TEC-Mos cu canal indus (figura 2.34). Tranzistorul nu mai este blocat la u_{GS} zero. Linia i_D corespunzatoare $u_{GS}=0$ este undeva la mijlocul familiei de caracteristici.

Ca si in cazul TEC-MOS cu canal indus, exista o zona liniara de crestere in care tranzistorul se comporta ca o rezostenta reglabila, una neliniara de trecere si zona de saturatie cu i_D constant la variatia u_{DS} . Pentru a bloca tranzistorul este nevoie de o tensiune de comanda negativa. Valoarea de blocare se mai numeste tensiune de patrundere, u_p .

Polarizarea tranzistoarelor MOS

La fel ca in cazul tranzistorului bipolar, pentru a aduce TEC-MOS intr-un anumit punct de functionare folosind o singura sursa de alimentare este nevoie de o



2.36 Scheme echivalente pentru TEC-MOS

retea de polarizare. Circuitele utilizate curent pentru polarizarea TEC-MOS sunt prezentate în figura 2.35.

Pentru TEC-MOS cu canal initial circuitul este similar circuitului de polarizare cu divizor rezistiv pentru tranzistorul bipolar. Deoarece TEC-MOS este mai puțin influentat de modificările de temperatura lipsește de obicei rezistența de stabilizare termică..

Pentru TEC-MOS cu canal initial se utilizează o schema denumită schema de plarizare cu negativare automată a grilei, figura 2.35b. Curentul de grila fiind nul, potențialul grilei este zero. Dar curentul de drena produce o creștere a potențialului sursei și atunci u_{GS} este automat negativă.

Scheme echivalente

Ca și în cazul tranzistoarelor bipolare rezolvarea circuitelor cu TEC-MOS se face prin metode grafice sau prin înlocuirea tranzistoarelor cu scheme echivalente liniare. În figura 2.36 sunt prezentate două circuite echivalente mai des utilizate. Primul este valabil pentru frecvențe joase, al doilea pentru frecvențe ridicate. În spațiul de intrare rezistența este foarte mare și este presupusă infinită. Doar la schema de frecvență ridicată se consideră spațiul echivalent cu capacitatea electrică dintre grila și sursă. Între bornele principale, drena și sursă, TEC-MOS se comportă similar cu cel bipolar, fiind echivalent cu un generator de curent comandat de tensiunea de intrare. Factorul de proporționalitate se numește panta tranzistorului, g_m . De obicei se mai ia în considerare și rezistența echivalentă între drena și sursă, r_{DS} . Iar pentru schema de frecvențe ridicate mai apare un condensator între drena și grila.

2.4.2 TEC – J

Structura și principiul de funcționare

Tranzistorul TEC-J are structura prezentată în figura 2.37a. Acesta este format dintr-un substrat de material semiconductor impurificat, în cazul de față un material de tip n . Electrozii principali care se numesc tot Sursă și Drenă sunt conectați la capetele substratului. Suprafața laterală a substratului este de tip opus, în cazul de față un

material de tip p . Electrocul de comanda denumit Grila este conectat la suprafata laterala.

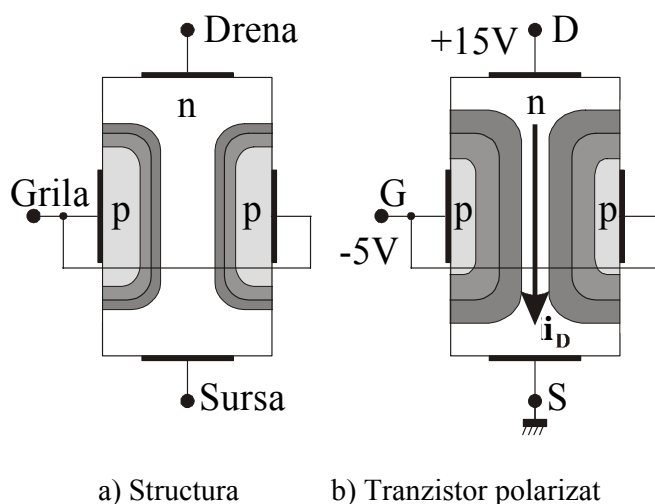


Fig. 2.37 Structura si principiul de functionare al TEC-MOS

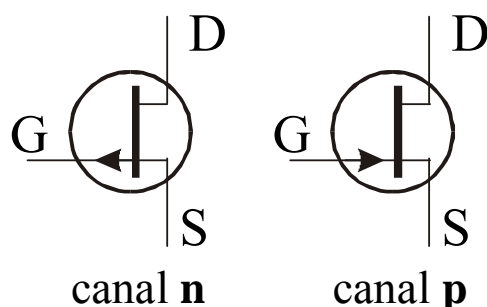


Fig. 2.38 Simbolurile TEC-J

Cand electrozii nu sunt polarizati structura este asemenea unei jonctiuni $p-n$ fara tensiune aplicata (figura 2.6). Exista la limita jonctiunii un camp electric intern si o zona de sarcina spatiala golita de purtatori mobili de sarcina, zona cu rezistenta electrica foarte mare. Spatiul de material n de rezistenta electrica scazuta formeaza un canal n intre electrozii principali.

TEC-J este destinat a functiona cu o polarizare inversa a jonctiunii (figura 2.37b) astfel ca, presupunand sursa legata la masa, potentialul grilei este intotdeauna mai mic sau egal cu zero. Prin negativarea grilei si deci a zonei p campul intern se mareste si se mareste si zona de sarcina spatiala iar in consecinta se ingusteaza canalul conductor.

Atunci cand drena este polarizata pozitiv prin canalul conductor va circula un curent de drena, i_D . Intensitatea curentului depinde direct de largimea canalului si in consecinta de marimea campului intern sau a tensiunii de comanda care este tensiunea u_{GS} .

Daca negativarea grilei creste, la o anumita tensiune de grila $u_{GS} = u_p$, tensiunea de patrundere, canalul conductor se inchide, curentul de drena se anuleaza, tranzistorul se blocheaza

Clasificare si simboluri

Varianta de tranzistor prezentata in sectiunea anterioara are denumirea completa TEC-J cu canal n . Ca si in cazul celorlalte tranzistoare exista si varianta in care zonele de material semiconductor sunt de polaritate opusa si care se numeste TEC-J cu canal p .

Simbolurile pentru variantele de TEC-J sunt prezentate in figura 2.38.

Caracteristici grafice

Modul și zonele de funcționare ale TEC-J sunt similare cu cele ale TEC-MOS. Familia de caracteristici grafice de ieșire, i_D funcție de u_{DS} cu parametru tensiunea grila-sursă u_{GS} este prezentată în figura 2.39. Ele sunt

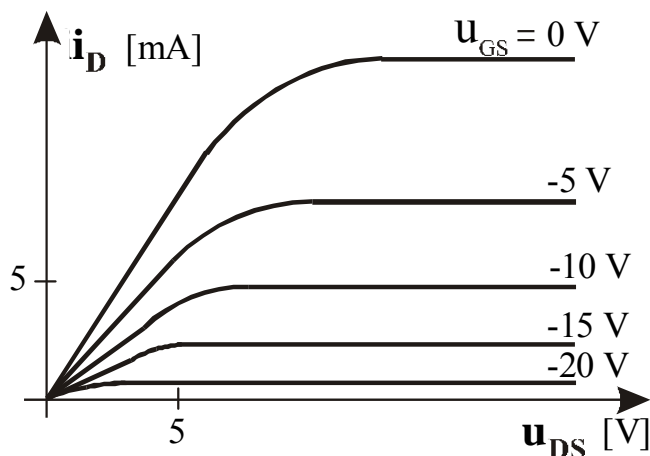


Fig. 2.39 Caracteristicile de ieșire ale TEC-J

desenate pentru modul de polarizare cel mai utilizat, cu tensiune pozitivă drenă sursă. Ca și TEC-MOS, TEC-J poate funcționa pentru ambele polarități ale tensiunii de ieșire drenă-sursă dar trebuie păstrată polarizarea negativă a jonctiunii.

La tensiuni mici de drenă curentul crește liniar. Panta scestuia depinde de tensiunea de comandă u_{GS} . În zona liniară de variație (zona care se întinde și la valori

negative u_{DS}) tranzistorul se comportă ca o rezistență reglabilă, comandată de u_{GS} .

Urmează o zonă neliniară de trecere și apoi zona de saturatie cu o evoluție a curentului principal asemănătoare cu aceea de la tranzistoarele bipolare în zona de funcționare activă. Curentul rămâne constant o dată cu creșterea în continuare a tensiunii u_{DS} . Pentru a bloca tranzistorul este nevoie de o tensiune de comandă negativă mare. Valoarea de blocare se numește tensiune de patrundere, u_p .

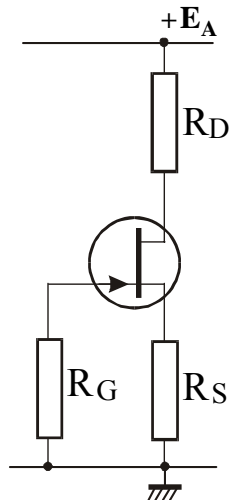


Fig. 2.40 Circuit de polarizare a TEC-J

Polarizarea tranzistoarelor TEC-J

Pentru TEC-J cu canal inițial se utilizează o schemă de polarizare cu negativare automată a grilei, figura 2.35b. Curentul de grila fiind nul, potențialul grilei este zero. Dar curentul de drenă produce o creștere a potențialului sursei și atunci u_{GS} este automat negativă.

Scheme echivalente

Ca și în cazul tranzistoarelor prezentate până acum rezolvarea circuitelor cu TEC-J se face prin metode grafice sau prin înlocuirea tranzistoarelor cu scheme echivalente liniare. Schemele echivalente sunt similare cu cele ale TEC-MOS prezentate în figura 3.36.

2.6 Dispozitive optoelectronice

Dispozitivele optoelectronice sunt dispozitive electronice care au legatura cu radiatia electromagnetica optica ce cuprinde spectrul infrarosu, vizibil si ultraviolet.

2.6.1 Prezentare generala

Exista trei categorii de dispozitive optoelectronice in functie de procesul optoelectronic intern:

- fotovoltaiice
- fotosensibile
- fotoemisive

Dispozitivele fotovoltaiice transforma energia radiatiilor optice direct in energie electrica. Se mai numesc fotocelule sau celule solare. Celule solare existente astazi au randamentul transformarii mic si pretul raportat la puterea electrica generata mare. Sunt utilizate pentru alimentarea sistemelor portabile de mica putere sau a celor aflate in locuri speciale, de exemplu in spatiul cosmic.

Dispozitivele fotosensibile sunt dispozitive semiconductoare care au parametri ce sunt puternic influentati de radiatia optica. Sunt utilizate de obicei pentru a sesiza prezenta si intensitatea radiatiei optice si se mai numesc din acest motiv si dispozitive fotodetectoare.

Dispozitivele fotoemisive transforma energia electrica in radiatii optice.

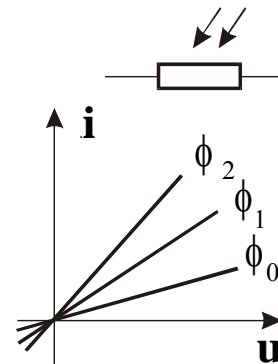


Fig.2.55 Fotorezistenta

2.6.2 Dispozitive fotosensibile

Dispozitivele fotosensibile sunt dispozitive semiconductoare care au o parte expusa radiatiei optice, printr-o fereastră transparentă, care de multe ori realizează și o concentrare a radiatiei. Ele sunt fotorezistenta, fotodioda, fototranzistorul și fototiristorul.

Fotorezistenta

Fotorezistenta este o formă dintr-o peliculă de material semiconductor depusă pe un substrat izolant, cu două terminale conectate la extremități. Suprafața peliculei este expusă radiatiei optice și valoarea rezistenței electrice între terminale depinde de intensitatea radiatiei. Simbolul și caracteristicile grafice curent-tensiune pentru diferite valori ale fluxului de radiații optice sunt prezentate în figura 2.55.

Fotodioda

Fotodioda este o dioda care are zona jonctiunii p-n expusa radiatiei optice. Simbolul si caracteristicile grafice curent tensiune pentru diferite valori ale fluxului de radiatii optice sunt prezentate in figura 2.56. Fotodioda este destinata sa functioneze in regim de polarizare inversa. Intr-un astfel de regim o dioda este parcursa de un curent mic numit curent de saturatie, I_s (figura 2.9). Pentru fotodioda acest curent depinde de intensitatea radiatiei optice. In lipsa radiatiei exista un curent invers mic numit curent de intuneric (curba pentru flux zero, Φ_0). In prezenta radiatiei curentul invers creste o data cu cresterea intensitatii fluxului radiatiei optice. Sensibilitatea fotodiodei depinde si de lungimea de unda a radiatiei. Exista fotodiode sensibile la radiatie luminoasa sau la radiatie in infrarosu. Curentul invers ramane insa mic, de ordinul microamperilor, motiv pentru care fotodioda este mai putin utilizata ca element fotodetector, dispozitivul cel mai folosit in acest scop fiind fototranzistorul.

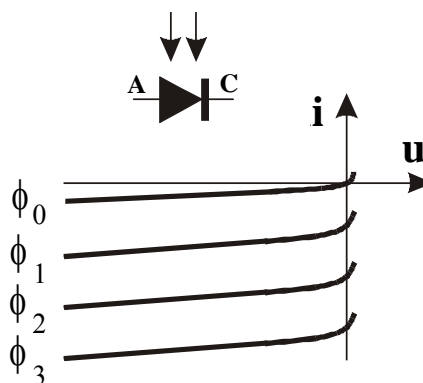


Figura 2.56 Fotodioda

Fototranzistorul

Fototranzistorul este un tranzistor care are zona jonctiunii baza-colector expusa radiatiei optice. Simbolul si caracteristicile grafice curent tensiune pentru diferite valori ale fluxului de radiatii optice sunt prezentate in figura 2.57.

Radiatia luminoasa actioneaza ca un element de comanda, curentul principal prin tranzistor, curentul de colector dedepinde de radiatia luminoasa la fel cum la un tranzistor comun acelasi curent depinde de curentul de baza. Din acest motiv la majoritatea fototranzistoarelor baza nici nu este conectata la un terminal si fototranzistorul are de cele mai multe ori doar doua terminale, colectorul si emitorul. Sensibilitatea unui fototranzistor este mult mai mare decat a fotodiodei deoarece la fototranzistor intervine si capacitatea de amplificare a acestuia. Curentii sunt de ordinul miliamperilor. Fototranzistorul are si un dezavantaj, inertia lui fiind mai mare decat a fotodiodei. Intarzierea cu care curentul urmeaza variatiile de flux luminos sunt de ordinul zecilor de microsecunde.

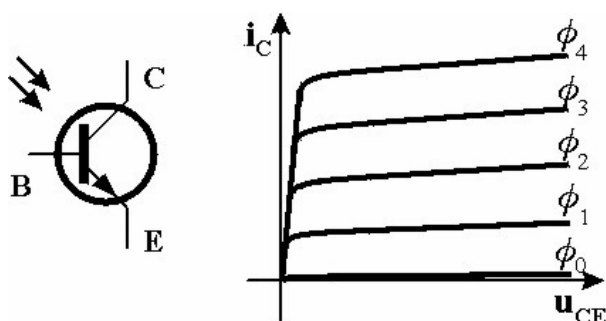


Figura 2.57 Fototranzistorul

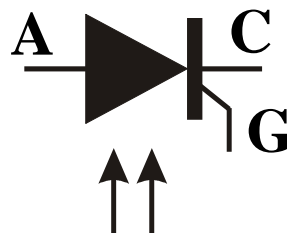


Fig 2.58 Fototiristorul

Fototiristorul

Fototiristorul sau LAT (Light Activated Thyristor) este un tiristor care are zona jonctiunii grila-catod expusa radiatiei optice. Simbolul este prezentat in figura 2.58.

Radiatia luminoasa actioneaza si in acest caz ca un element de comanda. Fototiristorul este aprins cu ajutorul unui flux de radiatie optica. Stingerea se face la fel ca la tiristorul obisnuit, prin inversarea tensiunii la bornele principale, anod-catod. Semnalul de comanda poate fi transmis prin fibra optica. Se obtine o separare galvanica foarte buna intre circuitul de comanda si tiristor, indispensabila atunci cand tiristorul este utilizat in circuite de inalta tensiune (kilovolti, zeci de kilovolti).

2.6.3 Dispozitive fotoemisive

Doua sunt dispozitivele fotoemisive care se folosesc mult in electronica moderna. Primul este dioda luminiscenta, o dioda care emite radiatie optica, luminoasa sau in infrarosu atunci cand este parcursa de curent electric. In combinatie cu o fotodioda sau un fototranzistor dioda luminiscenta formeaza un alt dispozitiv utilizat intens, optocuplorul

Al doilea este tubul catodic, care transforma semnalele electrice intr-un flux variabil de electroni si apoi prin intermediul unei substante speciale numita luminofor transforma acest flux de electroni in imagini optice.

Dioda luminiscenta

Dioda luminiscenta este cunoscuta si sub denumirea de LED de la numele acesteia in engleza, Light Emitting Diode. Simbolul este prezentat in figura 2.59. Dioda are zona jonctiunii accesibila in exterior printr-o fereastră care poate fi de forme diferite. Atunci cand este polarizata direct si este parcursa de curent dioda emite energie sub forma de radiatie optica, luminoasa, de culori diferite, sau in infrarosu. Intensitatea luminoasa depinde de intensitatea curentului. Diodele luminiscenta au de obicei un prag de deschidere mai mare decat diodele obisnuite, situat in jurul valorii de 2 volti.

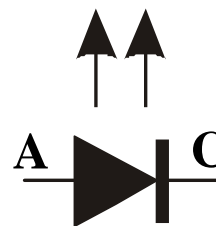


Figura 2.59 Dioda luminiscenta

Diodele luminiscente se folosesc ca indicatoare optice, inlocuindu-le pe acelea cu becuri. Avantajele sunt consum mult mai mic de energie electrica si durata de viata mult mai mare

Optocuplorul

Optocuplorul este un dispozitiv format dintr-un element fotoemisiv (o dioda luminiscenta), un spatiu de propagare optic care poate fi pur si simplu un spatiu gol, dar

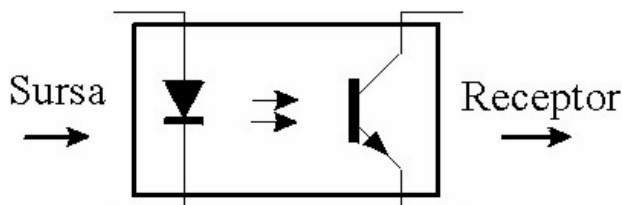


Figura 2.60 Optocuplorul

poate fi un cablu de fibra optica sau un izolan transparent si un element fotoemisiv, in cele mai multe cazuri un fototranzistor (figura 2.60). Optocuplorul permite realizarea unei izolari electrice perfecte intre doua circuite dar asigura in acelasi timp transmiterea unor semnale electrice intre cele doua circuite. Optocuplorul este un dispozitiv unidirectional, transmite un semnal de la un circuit sursa la un circuit receptor. Semnalul electric de la sursa este transformat in semnal luminos, transmis prin spatiul de propagare optic si transformat din nou in semnal electric in circuitul receptor.

Tubul catodic

Un tub catodic este format dintr-un tub de sticla vidat care are o forma aparte, figura 2.61. In extremitatea mai subtire tubul are un sistem de electrozi care se numeste tun electronic si care poate emite si focaliza electroni intr-un fascicul foarte subtire. Un al doilea sistem de electrozi, plasat la mijlocul tubului si care poate fi in interiorul sau in exteriorul tubului, formeaza sistemul de

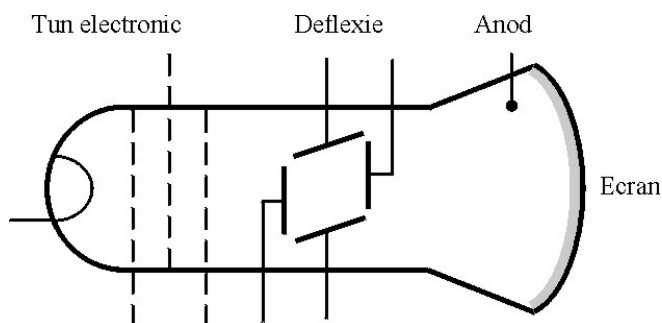


Figura 2.61 Tubul catodic

deflexie, adica sistemul care poate controla directia fasciculului de electroni. In fine, in partea largita a tubului, care se termina cu o suprafata relativ plana, ecranul, este fixat un electrod, anodul, care asigura accelerarea fasciculului. Ecranul este acoperit cu o substanta care sub actiunea unui flux de electrtroni emite radiatie luminoasa, substanta care se numeste luminofor. Fluxul de electroni dirijat loveste suprafata ecranului si produce o imagine optica care este in corespondenta cu semnale ce controleaza tunul electronic pentru intensitate și electrozii de deflexie pentru pozitia pe ecran.