

## Capitolul XII

### DISPOZITIVE SEMICONDUCTOARE MULTIJONCȚIUNE

În afara dispozitivelor semiconductoare studiate în prima parte a lucrării, există și alte dispozitive destul de mult utilizate mai ales în circuitele de conversie a energiei electrice. Acestea sunt **tiristorul și triacul, diacul și dioda Shockley**. Funcționarea lor se bazează pe proprietățile electrice ale unor structuri care includ trei sau mai multe joncțiuni, motiv pentru care sunt denumite dispozitive semiconductoare multijoncțiune.

Principalele proprietăți ale structurii multijoncțiune pot fi puse în evidență în cazul diodei Shockley care este o structură de tip **p-n-p-n**.

#### 1. DIODA SHOCKLEY

Dioda Shockley este alcătuită din patru straturi succesive de material semiconductor: **p-n-p-n** (figura 157). Ea are, ca orice diodă numai două terminale: terminalul conectat la prima regiune, de tip **p**, se numește anod iar terminalul conectat la ultima regiune, de tip **n**, se numește catod.

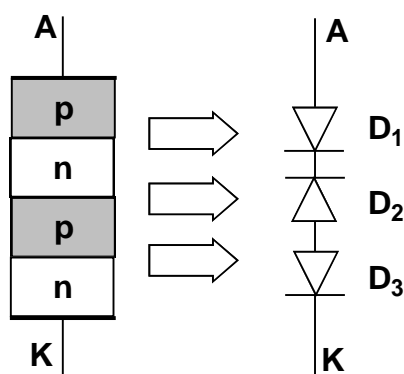


figura 157. Structura p-n-p-n și schema echivalentă cu 3 diode

Cele trei joncțiuni pe care le formează straturile structurii pot fi privite ca trei diode. Cum dioda  $D_2$  este plasată în opoziție cu celelalte două diode, este de presupus că indiferent de polaritatea tensiunii dintre anod și catod, această structură nu conduce curent. Dacă ținem cont de fenomenul nedistructiv de străpungere a joncțiunii **pn** despre care s-a discutat în primul capitol, vom putea trage o altă concluzie

privitoare la comportarea acestei structuri.

**Dacă  $V_{AK} > 0$**  diodele  $D_1$  și  $D_3$  sunt direct polarizate și prin urmare toată tensiunea  $V_{AK}$  i se aplică diodei  $D_2$ , singura care este invers polarizată.

**Dacă tensiunea aplicată este mai mare decât tensiunea de străpungere a diodei  $D_2$  ea va intra în conducție inversă**, și prin urmare prin dioda Shockley va trece un curent limitat numai de circuitul exterior, rezistența ei internă fiind foarte mică. Până acum comportarea structurii ar fi identică cu comportarea unei diode Zener. Dar, **spre deosebire de dioda Zener, dioda Shockley odată amorțată nu se blochează dacă tensiunea  $V_{AK}$  scade sub valoarea tensiunii de străpungere a diodei  $D_2$** .

Pentru a explica acest fenomen, vom face referire la figura 158 unde este prezentată o altă schemă echivalentă utilizabilă pentru structura **p-n-p-n**, schema echivalentă cu doi tranzistori.

Pe baza acestei scheme echivalente se poate observa că apariția curentului  $I_{AK}$  determinată de străpungerea joncțiunii din mijlocul structurii, determină apariția

curentului de colector,  $I_1$ , al tranzistorului  $Q_1$ . Dar  $I_1$  este în același timp curentul de bază al tranzistorului  $Q_2$ .

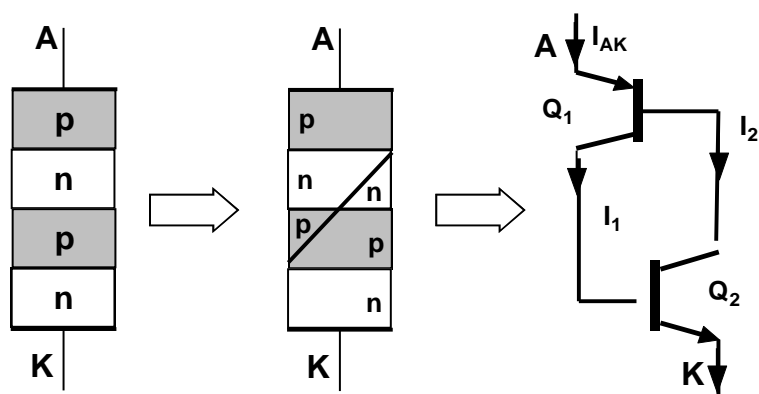


figura 158. Structura  $p-n-p-n$  și schema echivalentă cu doi tranzistori

Prin urmare va apărea curentul de colector al tranzistorului  $Q_2$ :

$$I_2 = \beta_2 \times I_1$$

Acest curent este pentru  $Q_1$  curent de bază și va determina creșterea curentului de colector al acestuia la valoarea:

$$I_1 = \beta_1 \times I_2$$

Prin urmare apare următorul fenomen de reacție pozitivă internă, specifică structurii  **$p-n-p-n$** : străpungerea determină apariția  $I_{AK}$ , acesta este aproximativ egal cu  $I_1$ ,  $I_1$  determină creșterea  $I_2$ , acesta determină creșterea suplimentară a  $I_{AK}$ , și așa mai departe, fenomenul continuă până la intrarea în saturație a celor două tranzistoare.

**Dacă tensiunea  $U_{AK}$  scade sub valoarea de străpungere după declanșarea acestui proces, curentul  $I_{AK}$  nu dispăre, el fiind menținut de reacția pozitivă internă.**

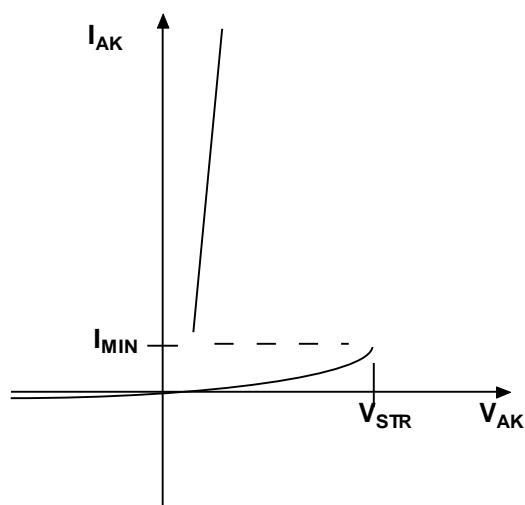


figura 159. Caracteristica statică a diodei Shockley

Dioda Shockley va putea fi blocată numai dacă tensiunea ei de alimentare scade la zero sau la o valoare suficient de mică pentru ca valoarea curentului prin dispozitiv să devină mai mică decât valoarea de automenținere  $I_{MIN}$ .

Caracteristica statică a acestui dispozitiv este cea prezentată în figura 159.

**Dacă  $V_{AK} < 0$** , referindu-ne din nou la figura 157 vom constata că **toate joncțiunile din structura p-n-p-n sunt blocate**:

- $D_1$  este blocată de tensiunea negativă aplicată anodului
- $D_3$  este blocată de tensiunea pozitivă care se aplică pe catod
- $D_2$  nu este polarizată deloc deoarece diodele  $D_1$  și  $D_3$ , blocate, o izolează de sursa de tensiune.

În această situație dioda nu va intra în conducție, indiferent de valoarea tensiunii inverse aplicate. Din acest motiv graficul caracteristicii statice din figura 159 nu este simetric față de origine.

Diodele Shockley pot fi utilizate ca generatoare de impulsuri. În figura 160 este prezentat simbolul diodei Shockley într-un montaj generator de impulsuri.

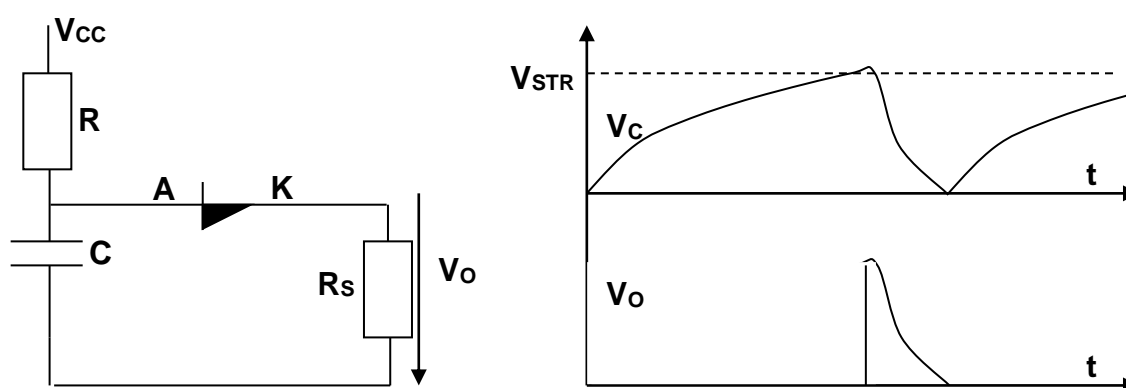


figura 160. Generator de impulsuri cu dioda Shockley și formele de undă aferente

La punerea sub tensiune a montajului, condensatorul C are tendința de a se încărca prin R, la valoarea  $V_{CC}$ . Aceasta se alege mai mare decât tensiunea de străpungere a diodei Shockley. Când tensiunea pe condensator depășește  $V_{STR}$  dioda se străpunge și curentul prin ea crește brusc, fiind limitat numai de rezistența de sarcină  $R_s$ . Condensatorul se va descărca prin rezistența de sarcină, determinând apariția unui impuls la ieșire. Când tensiunea pe condensator devine 0 dioda se blochează și ciclul se reia din nou. Dacă:

$$R_s \ll R$$

atunci frecvența impulsurilor generate depinde numai de valorile R și C. Durata impulsului generat depinde de  $R_s$  și C. Amplitudinea impulsului generat este aproximativ egală cu  $V_{STR}$ .

## 2. TIRISTORUL

Tiristorul este o structură **p-n-p-n**, ca și dioda Shockley, dar mai are un electrod de comandă, **poarta sau grila, G** (figura 161).

Tiristorul poate intra în conducție, exact ca și dioda Shockley, ca urmare a depășirii tensiunii de străpungere, atunci când  $V_{AK} > 0$ . Nu acesta este modul uzual de folosire al tiristorului. El este comandat de obicei prin grilă.

**Un impuls pozitiv aplicat între grilă și catod atunci când tensiunea  $V_{AK} > 0$  va determina intrarea în conducție a tiristorului chiar dacă tensiunea  $V_{AK}$  este mai mică decât tensiunea de străpungere.**

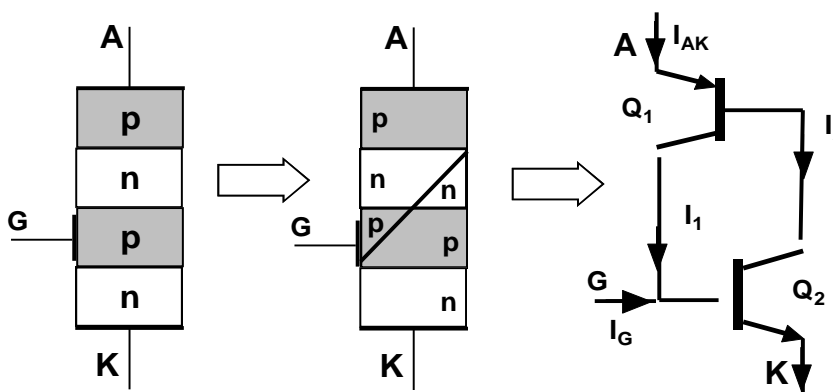


figura 161. Structura tiristorului și schema echivalentă cu doi tranzistori

Aplicarea unui impuls pozitiv  $u_{GK}$  are ca efect apariția curentului  $i_G$ , care este curent de bază pentru tranzistorul  $Q_2$ . Rezultă un curent de colector:

$$I_2 = \beta_2 \times I_G$$

Dar  $I_2$  este curent de bază pentru  $Q_1$ . Prin urmare în colectorul  $Q_1$  apare un curent:

$$I_1 = \beta_1 \times I_2$$

care este curent de bază pentru  $Q_2$ , ș.a.m.d., reacția pozitivă specifică structurii **p-n-p-n** a fost inițiată. Din acest moment impulsul de tensiune din grilă poate să dispară. Tiristorul va rămâne în conducție până la dispariția tensiunii de alimentare.

**Un impuls pozitiv aplicat între grilă și catod atunci când tensiunea  $V_{AK} < 0$  nu va determina intrarea în conducție a tiristorului.** Pe baza figurii 161 putem observa că în acest caz reacția pozitivă internă nu poate să apară datorită faptului că tranzistoarele nu sunt polarizate corect. Curentul injectat în baza  $Q_1$  nu poate determina apariția curentului  $I_1$  deoarece tensiunea colectorului acestui tranzistor este negativă față de emitor.

Din modul de funcționare al tiristorului este evident că dacă este alimentat cu tensiune continuă, atunci aceasta trebuie să fie astfel aplicată încât anodul să fie pozitiv față de catod. În caz contrar tiristorul nu poate fi adus în conducție. Însă **după intrarea în conducție, el nu va mai putea fi stins ca urmare a unui impuls pe poartă.**

Din acest motiv, tiristoarele sunt alimentate fie cu tensiune alternativă, fie cu tensiune redresată și nefiltrată, pentru ca tensiunea  $V_{AK}$  să devină periodic zero și astfel tiristorul să se poată bloca.

Figura 162 prezintă simbolul tiristorului într-un circuit foarte simplu care ilustrează principiul lui de funcționare, pe baza formelor de undă din cei trei electrozi ai dispozitivului.

Pe durata semialternanței pozitive a tensiunii anodice, impulsul de comandă din poartă aduce tiristorul în conducție. El va conduce și după dispariția acestui impuls, până când tensiunea anodică devine zero. Pe toată durata semialternanței negative tiristorul rămâne blocat, chiar dacă în acest timp primește impuls de comandă pe poartă. El va putea intra în conducție numai pe durata următoarei semialternanțe pozitive, dacă primește un nou impuls de comandă.

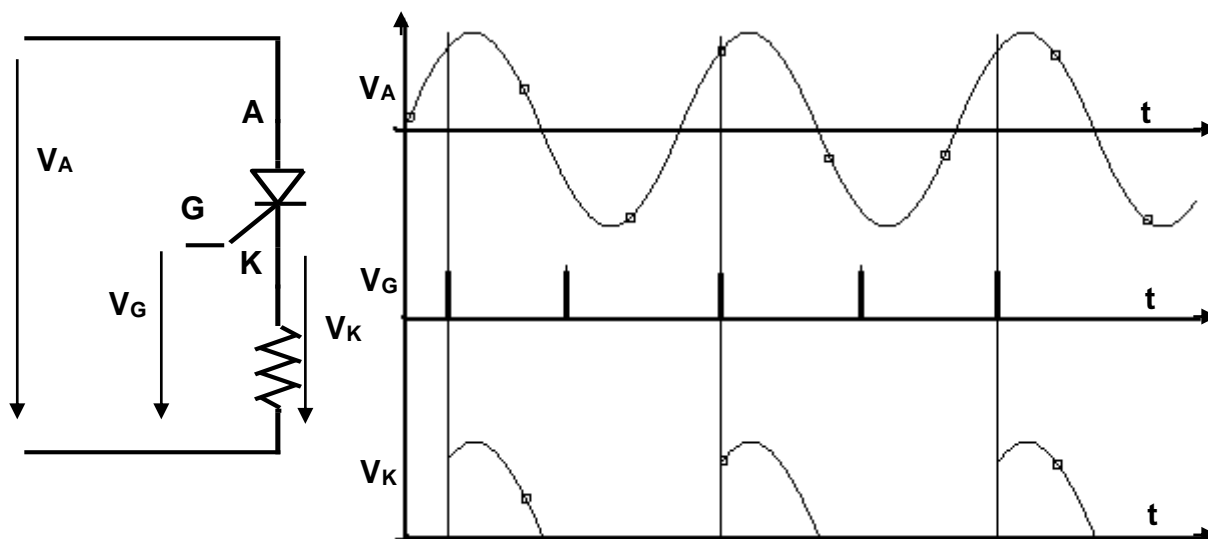


figura 162. Simbolul tiristorului și formele de undă la terminale în cazul alimentării cu tensiune alternativă

Se poate remarca din figura 162 că în acest circuit tiristorul se comportă ca un **redresor** monoalternanță **comandat**. El va permite numai semialternanței pozitive să ajungă pe rezistența de sarcină și numai după aplicarea impulsului de comandă în poartă. Partea din semialternanța pozitivă care ajunge la ieșire poate fi mai mică sau mai mare după cum momentul aplicării impulsurilor de comandă este mai departe sau mai aproape de începutul semialternanței pozitive. În consecință **valoarea medie a tensiunii redresate poate fi comandată prin alegerea momentului în care se aplică impulsul de comandă**.

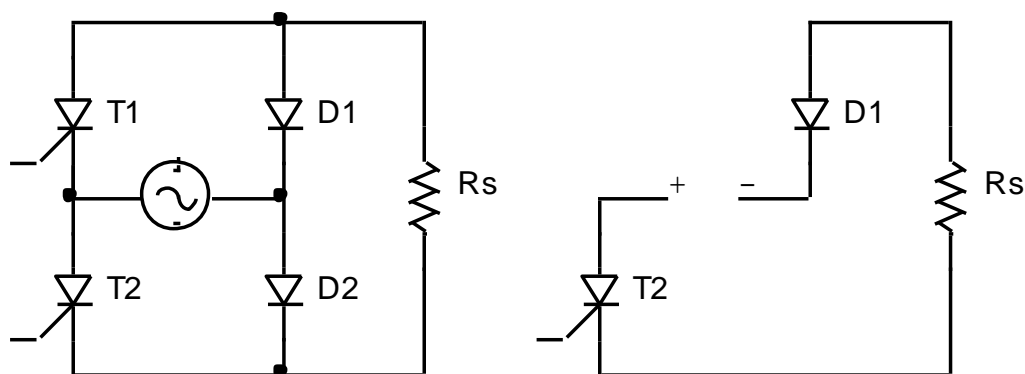


figura 163. Punte comandată

Un redresor comandat se poate realiza și în varianta dublă alternanță. În acest caz, așa cum se vede în figura 163, în puntea clasică de redresare cu diode, o ramură de diode se înlocuiește cu o ramură de tiristori.

În figura 163 se poate vedea un detaliu de funcționare pe durata semialternanței în care anodul  $T_2$  este pozitiv. În acest caz, curentul poate trece prin rezistența de sarcină prin  $T_2$  și  $D_1$  dar numai după ce  $T_2$  primește impuls de comandă pe poartă.  $T_1$  este blocat de plusul din catod iar  $D_2$  de minusul din anod astfel că ele nu apar în schema echivalentă pentru această semialternanță.

Evident, pe durata celeilalte semialternanțe, curentul va trece prin  $R_s$  prin  $T_1$  și  $D_2$  numai dacă  $T_1$  primește impuls de comandă în poartă în acest interval de timp.

### 3. TRIACUL

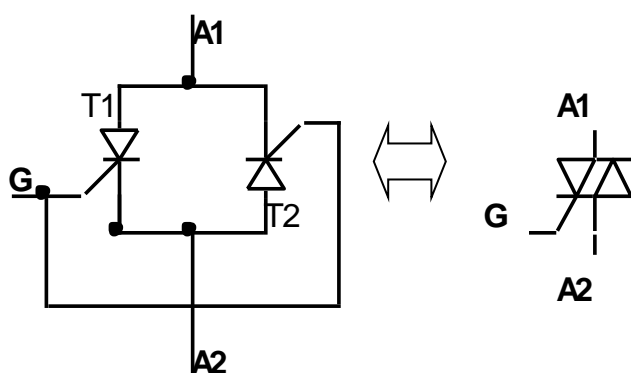


figura 164. Schema echivalentă și simbolul de circuit al triacului

La nivelul discuției noastre putem privi triacul ca fiind format din doi tiristori legați în antiparalel, având poarta de comandă comună (figura 164).

**Dacă  $V_{A1A2} > 0$**  tiristorul  $T_1$  poate să conducă curentul dacă primește impuls de comandă pozitiv în poartă. Acest impuls se aplică implicit și tiristorului  $T_2$  dar asupra acestuia nu are efect deoarece anodul acestuia este invers față de catod.

**Dacă  $V_{A1A2} < 0$**  tiristorul  $T_2$  poate să conducă curentul dacă primește impuls de comandă negativ în poartă. Acest impuls se aplică implicit și tiristorului  $T_1$  dar asupra acestuia nu are efect deoarece este invers polarizat. **Blocarea triacului se produce numai atunci dacă  $V_{A1A2} = 0$ .**

Dacă impulsurile de comandă se dau exact în momentul trecerii prin zero al

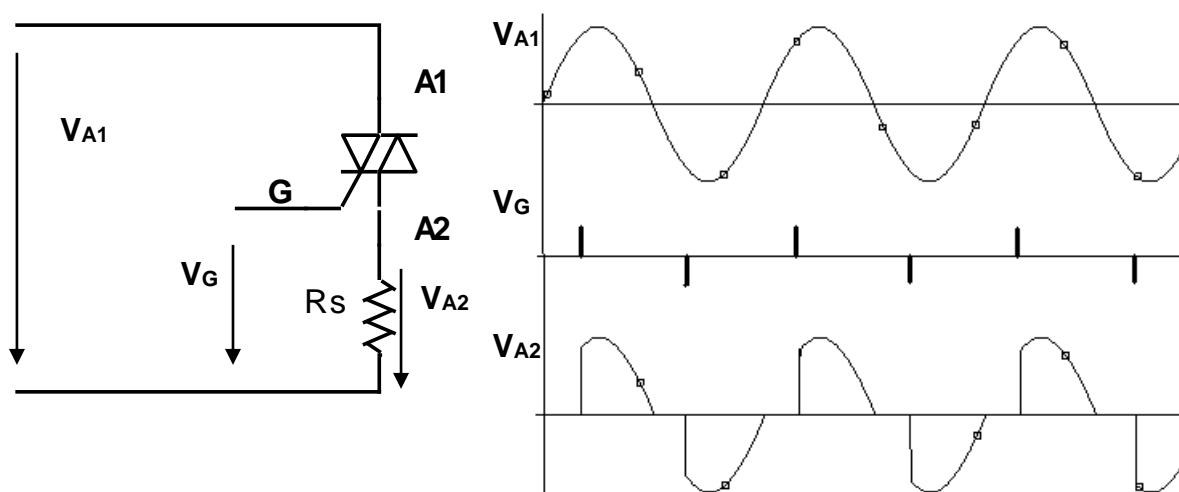


figura 165. Variator de tensiune alternativă cu triac.

tensiunii dintre anodi, triacul va conduce pe toată perioada semnalului alternativ. Cu cât impulsul de comandă se dă mai târziu față de trecerea prin zero a tensiunii dintre anodi, cu atât mai scurtă este durata dintr-o perioadă în care triacul conduce. Prin urmare triacul poate fi folosit ca variator de tensiune alternativă (figura 165).

#### 4. DIACUL

Diacul are aceeași structură ca și triacul dar nu are scos electrod de comandă. El mai poate fi privit și ca fiind format din două diode Shockley puse în antiparalel. Prin urmare, diacul va intra în conducție atunci când tensiunea dintre anodii lui va depăși valoarea de străpungere, în sens pozitiv sau negativ. Pentru a se stinge este nevoie ca tensiunea dintre anodi să devină zero.

Având în vedere faptul că poate conduce curent în ambele sensuri, diacul este folosit adesea pentru generarea impulsurilor de comandă ale triacelor. Un circuit simplu de acest fel este prezentat în figura 166, în care se poate vedea și simbolul diacului.

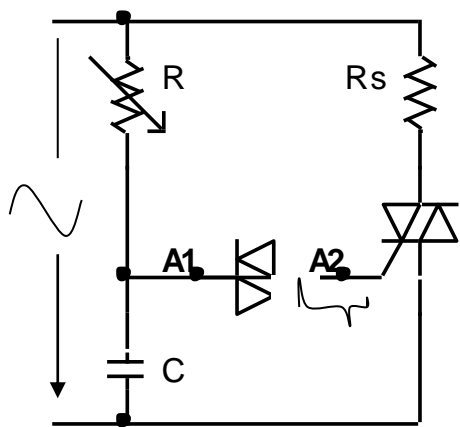


figura 166. Comanda triacului cu diac

Atunci când pe durata semialternanței pozitive, tensiunea de intrare (de obicei tensiunea rețelei de 220V) depășește tensiunea de străpungere a diacului, acesta intră în conducție și injectează curent în poarta triacului. Prin urmare triacul intră în conducție.

La trecerea prin zero a tensiunii de alimentare, atât diacul cât și triacul se blochează.

Diacul va intra din nou în conducție atunci când tensiunea de intrare depășește tensiunea de străpungere în sens negativ. Triacul va primi un impuls negativ de comandă în poartă și va intra în conducție.

Blocarea se va produce din nou la trecerea prin zero a tensiunii de alimentare.

Acest circuit foarte simplu se utilizează de exemplu pentru reglarea intensității luminii unui bec. În acest caz  $R_s$  este un bec cu incandescență. Valoarea curentului prin bec, deci și intensitatea luminii emise de filamentul lui, depind de durata de conducție a triacului. Aceasta depinde de valoarea tensiunii de străpungere a diacului. Dar tensiunea de pe diac depinde de poziția cursorului potențiometrului R. Din acest potențiometru se poate regla între anumite limite intensitatea luminii.

Ca o concluzie a acestui capitol, în tabelul următor sunt prezentate principalele dispozitive semiconductoare multijuncțiune și modul în care pot fi amorțate sau blocate.

<i>dispozitiv</i>	<i>amorsare</i>	<i>blocare</i>
<b><i>dioda Shockley</i></b>	$V_{AK} > V_{STR}$	$V_{AK} = 0$
<b><i>diacul</i></b>	$V_{A1A2} > V_{STR}$ $V_{A1A2} < -V_{STR}$	
<b><i>tiristorul</i></b>	$V_{AK} > 0$ și impuls de comandă în poartă	
<b><i>triacul</i></b>	$V_{A1A2} \neq 0$ și impuls de comandă în poartă	

## Capitolul XIII

### DISPOZITIVE OPTOELECTRONICE

Dispozitivele optoelectronice sunt acele componente electronice semiconductoare ale căror proprietăți electrice sunt modificate prin expunere la lumină, sau, cele care emit lumină în funcție de curentul care trece prin ele.

Lumina este o radiație electromagnetică caracterizată prin frecvență ( $f$ ) sau mai des prin lungimea de undă ( $\lambda$ ). Aceste două mărimi nu sunt independente ci legate prin relația:

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

în care  $c$  este viteza luminii ( $3 \times 10^8$  m/s).

Lungimea de undă este exprimată mai ales în angstromi ( $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ ). Lumina vizibilă are o lungime de undă cuprinsă între 4000 – 7000 Å sau în termeni de frecvență  $4,3 \times 10^{14}$  –  $7,5 \times 10^{14}$  Hz. Frecvența cea mai mică este percepută de ochiul uman ca având culoarea roșie, frecvența cea mai mare este percepută ca violet. Lumina albă este de fapt un amestec de radiații de diferite frecvențe din spectrul vizibil.

Radiațiile electromagnetice cu frecvența mai mică decât a radiațiilor din spectrul vizibil, până la  $10^{12}$  Hz se numesc infraroșii iar cele cu frecvența mai mare decât spectrul vizibil, până la  $5 \times 10^{17}$  Hz, se numesc ultraviolete.

Ochiul uman are sensibilitatea maximă pentru culoarea galben, deci, pentru radiațiile electromagnetice cu lungimea de undă de 5700 Å. Ca și în cazul unui amplificator, sensibilitatea este mai mică pentru frecvențele din capetele benzii vizibile, adică, pentru roșu și violet.

#### 1. FOTOREZISTENȚA

Fotorezistența este un dispozitiv realizat din material semiconductor care este astfel încapsulat încât suprafața semiconductorului să poată fi expusă la lumină.

Trebuie să ne reamintim că într-un semiconductor, perechile electron – gol, deci purtătorii liberi de sarcină, sunt generați datorită energiei pe care aceștia o primesc din mediu. Până acum am făcut referire la energia termică drept sursă de energie suplimentară. În cazul dispozitivelor optoelectronice, energia luminii este sursa care determină generarea perechilor electron – gol.

O fotorezistență, realizată din material semiconductor, va avea cu atât mai mulți purtători liberi de sarcină electrică cu cât intensitatea radiației luminoase la care este expus dispozitivul este mai mare. Ele sunt prin urmare dispozitive fotoconductive, adică conductivitatea lor este proporțională cu intensitatea luminii incidente.

În figura 167 este prezentat simbolul de circuit al fotorezistenței și un circuit simplu care exploatează proprietățile ei.

Când fotorezistența din figura 167 este iluminată, rezistența ei este în jur de 20kΩ. În întuneric, rezistența ei crește la 100kΩ.

Intrarea  $V^+$  a amplificatorului se va afla prin urmare la un potențial:

$$V_{UMINA}^+ = \left[ \frac{50k}{20k + 50k} \right] (-6V) + \left[ \frac{20k}{20k + 50k} \right] (+6V) = -2.57V$$

sau

$$V_{NOAPTE}^+ = \left[ \frac{50k}{100k + 50k} \right] (-6V) + \left[ \frac{100k}{100k + 50k} \right] (+6V) = +2V$$

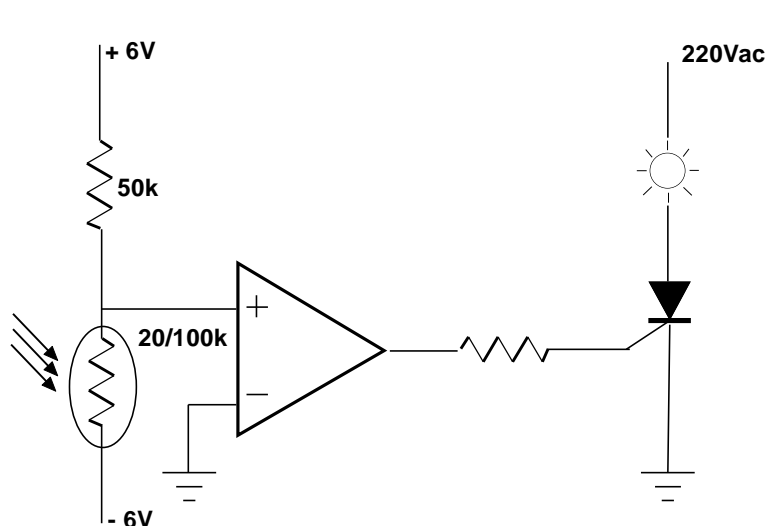


figura 167. Exemplu de utilizare a fotodiodei

În consecință ieșirea amplificatorului va amorsa tiristorul dacă fotorezistența nu este iluminată. Circuitul se poate folosi pentru aprinderea iluminatului atunci când se întunecă, dar, trebuie avut grijă ca lumina dată de becuri să nu ajungă la fotorezistență. În acest montaj ea nu poate face distincție între lumina zilei și lumina produsă de corpurile de iluminat.

## 2. FOTODIODA

Fotodioda este o joncțiune **pn** astfel încapsulată încât să poată fi expusă la lumină. Ea face parte ca și fotorezistența din categoria dispozitivelor fotoconductive, deoarece curentul care trece prin ea crește dacă este expusă la lumină.

Dacă este direct polarizată, o joncțiune **pn** are oricum o rezistență foarte mică și efectul fotoelectric este insesizabil. Dacă este invers polarizată joncțiunea are în schimb o rezistență foarte mare. Ea este traversată numai de un curent foarte mic de purtători minoritari, generați pe cale termică ca la diodele obișnuite. În cazul fotodiodelor rezistența joncțiunii invers polarizate scade foarte mult din cauza numărului mare de purtători minoritari generați ca efect al expunerii la lumină.

Deci, fotodioda, trebuie invers polarizată pentru a se exploata proprietățile fotoconductive. În acest caz, rezistența echivalentă a joncțiunii poate fi considerată practic infinită în condiții de întuneric, dar, poate ajunge la valori de ordinul sutelor de ohmi dacă este expusă la o lumină puternică.

Față de fotorezistențe, fotodiodele răspund aproape liniar la creșterea iluminării, deci, curentul prin ele este direct proporțional cu radiația luminoasă incidentă. De asemenea, viteza de răspuns la modificarea iluminării este mult mai bună decât în cazul fotorezistențelor care au o inerție mare.

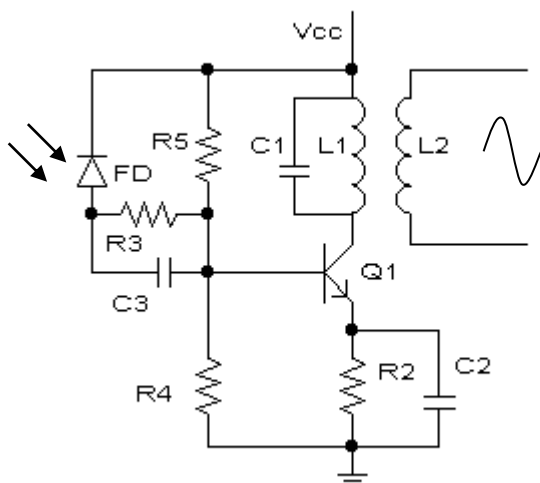


figura 168. Detector de semnal luminos

De exemplu, fotodioda MRD500, polarizată invers cu 20V are un curent maxim de 2nA în întuneric și un curent tipic de 9uA la iluminare de 5mW / cm<sup>2</sup>. Timpul de răspuns pentru această modificare a iluminării este de 1ns tipic.

Abilitatea fotodiodelor de a-și schimba aproape instantaneu rezistența la modificări relativ mici ale iluminării le face utilizabile în aplicații digitale de mare viteză cum sunt cititoarele optice de coduri de bare.

Circuitul figura 168 este sensibil numai la lumina becurilor cu incandescentă sau a tuburilor fluorescente sau cu descărcări în

gaze. Datorită inerției termice mici becurile produc o lumină cu mici fluctuații în jurul valorii medii. Deoarece intensitatea luminii nu depinde de polaritatea ci de valoarea absolută instantanee a tensiunii de alimentare, în cazul uzual de alimentare de la rețeaua de 220 V / 50 Hz, becurile vor produce o lumină care pâlpâie cu frecvența de 100Hz. Aceste fluctuații nu sunt percepute de ochiul omenesc dar sunt ușor sesizate de fotodiode, care au un timp de răspuns foarte scurt.

Circuitul este un amplificator selectiv în conexiune EC, polarizat prin divizorul de tensiune R<sub>4</sub> și R<sub>5</sub> și rezistența de emitor R<sub>2</sub>. La frecvența de lucru, (100Hz) această rezistență este decuplată prin condensatorul C<sub>2</sub>. Sarcina etajului este un circuit acordat pe 100 Hz, L<sub>1</sub> C<sub>1</sub>. Prin urmare la această frecvență circuitul va avea amplificare maximă, pentru frecvențe mai mari sau mai mici amplificarea se reduce foarte mult.

Rezistența R<sub>3</sub>, de valoare mare (100k), este necesară pentru polarizarea inversă a fotodiodei.

Lumina pâlpâitoare a becurilor va produce modificarea curentului invers prin diodă cu o frecvență de 100Hz. Acest semnal este aplicat amplificatorului selectiv prin condensatorul C<sub>3</sub>. Semnalul de ieșire este un semnal sinusoidal de 100Hz și se poate lua de pe înfășurarea L<sub>2</sub>, cuplată inductiv cu L<sub>1</sub>.

Lumina naturală prezintă variații mult mai lente. Deși ele produc efect asupra fotodiodei, semnalul dat de aceasta va fi atenuat de amplificator, deoarece, la frecvențe foarte mici, datorită inductanței L<sub>1</sub>, rezistența echivalentă din colectorul tranzistorului este foarte mică. În plus, nici rezistența din emitor nu este decuplată deoarece la frecvențe foarte mici condensatorul C<sub>2</sub> nu poate fi considerat scurtcircuit. Prin urmare putem vorbi de atenuarea semnalului în acest caz.

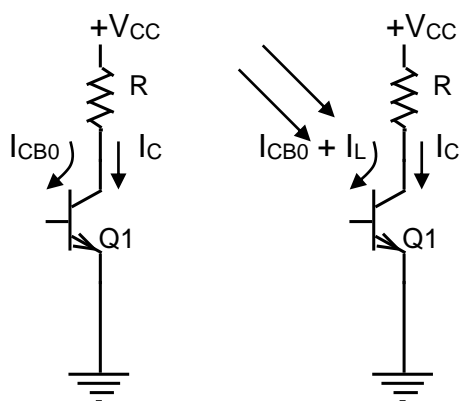
În consecință circuitul din figura 168 furnizează la ieșire un semnal sinusoidal cu frecvența de 100Hz și amplitudinea proporțională cu lumina emisă de becuri. Semnalul de ieșire va fi 0 dacă nu avem surse de lumină artificială în funcțiune.

După o amplificare de putere și redresare, semnalul sinusoidal de ieșire se poate folosi pentru a comanda înfășurarea unui releu.

### 3. FOTOTRANZISTORUL

Ca și fotodioda, fototranzistorul are o joncțiune **p-n** invers polarizată care poate fi expusă la lumină. Joncțiunea în cauză este joncțiunea colector bază. În figura 169 este prezentat fototranzistorul în situația în care nu este expus la lumină și în situația în care este expus la lumină.

În condiții de întuneric, curentul care trece prin joncțiunea colector bază este



$I_{CB0}$ .

În consecință curentul de colector va fi:

$$I_C = I_{CB0} + \beta I_{CB0} = (\beta + 1)I_{CB0}$$

În prezența luminii, joncțiunea colector bază va fi traversată de un curent suplimentar,  $I_L$ , datorat purtătorilor generați prin efect fotoelectric. Curentul de colector va fi în acest caz:

$$I_C = (\beta + 1)(I_{CB0} + I_L)$$

figura 169.  $I_C$  într-un fototranzistor

Curentul  $I_{CB0}$  este foarte mic față de curentul datorat luminii iar  $\beta$  este mult mai mare decât unitatea astfel curentul de colector poate fi aproximat prin relația:

$$I_C \cong \beta \times I_L$$

Se poate remarca faptul că față de o fotodiodă, fototranzistor are avantajul unei sensibilități de  $\beta$  ori mai mari. Dezavantajul lui este că timpul de răspuns este mai mic. Timpul de răspuns este de ordinul microsecundelor, față de nanosecunde în cazul fotodiodelor. Aplicațiile lui sunt aceleași ca și ale fotodiodelor numai că frecvența de lucru este mai mică.

Fototranzistoarele au capsula prevăzută cu o lentilă care focalizează lumina incidentă pe joncțiunea colector – bază. Unele au terminalul bazei care poate fi utilizat în scopul polarizării tranzistorului. Alte tipuri nu au terminalul de bază accesibil. Curentul de colector urmărește relativ liniar variațiile de lumină. Valori uzuale sunt  $2mA$  pentru o lumină de  $10mW/cm^2$  respectiv  $8mA$  pentru  $40mW/cm^2$ .

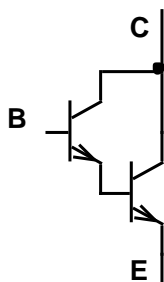


figura 170. Fotodarlington

Se utilizează și conexiunea fotodarlington. În acest caz, așa cum este reprezentat în figura 170 fototranzistorul este încapsulat împreună cu un alt tranzistor, cu care formează un tranzistor compus darlington. În acest caz sensibilitatea crește prin factorul de amplificare al tranzistorului suplimentar. Bineînțeles și viteza de răspuns scade în aceeași măsură. Dacă la fotodiode acest timp este de  $1ns$  iar la fototranzistori  $2\mu s$  în cazul fotodarlingtonului acesta poate ajunge la  $15\mu s$ . Este însă de remarcat faptul că dacă la fotodiode curentul produs de o iluminare de  $5mW/cm^2$  era de numai  $2\mu A$ , la fotodarlington ajunge să fie  $25mA$  pentru o iluminare de 10 ori mai mică.

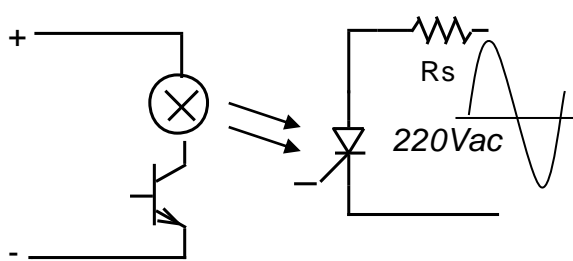


figura 171. Fototiristorul comandat cu un bec

Se construiesc de asemenea și fototiristori și fototriace. Ele se folosesc în cazurile în care partea de forță și partea de comandă a unui echipament trebuie perfect izolate galvanic. Cu un circuit de tipul celui din figura 171 se poate comanda cuplarea sarcinii  $R_s$  la sursa de tensiune prin intermediul luminii. Circuitul electronic care asigură comanda becului este complet izolat față de circuitul de forță, alimentat din rețeaua de curent alternativ.

#### 4. CELULA SOLARĂ

Celula solară este de fapt o fotodiodă cu o suprafață foarte mare. Ea asigură conversia energiei solare în energie electrică și poate fi utilizată ca sursă de alimentare. Ea este construită în forma unui disc din siliciu de tip *n* cu un strat foarte fin de tip *p* deasupra. Lumina penetrează stratul *p* și ajunge la joncțiunea *p-n* unde ca efect al ei se generează purtători minoritari. Dacă la bornele dispozitivului se cuplează o sarcină, ca în figura 172, curentul joncțiunii va trece prin rezistența de sarcină. Acest curent este de fapt curentul invers al joncțiunii la care se adaugă curentul generat prin efect fotoelectric:

$$I_L = I_{\text{FOTOELECTRIC}} + I_S \left(1 - e^{\frac{V}{V_T}}\right)$$

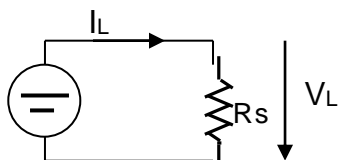


figura 172. Celula solară

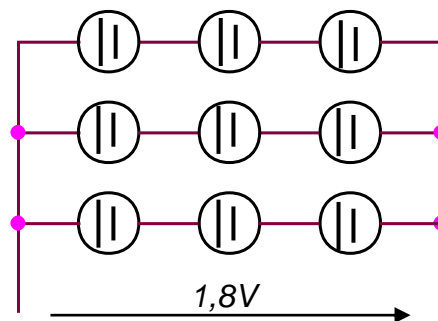


figura 173. Legarea celulelor solare în rețea serie - paralel

O valoare tipică a iluminării, la amiază, într-o zi însorită, este de  $100\text{mW/cm}^2$ . La această lumină o fotocelă poate debita peste  $1000\text{ mA}$  în scurtcircuit. La  $15\text{mW/cm}^2$  curentul de scurtcircuit va fi de  $200\text{mA}$ .

Valoarea tensiunii la bornele celulei solare este cuprinsă între  $600 - 650\text{mV}$  în funcție de valoarea iluminării.

Atunci când sunt utilizate ca surse de alimentare, celulele solare se leagă într-o rețea serie – paralel ca cea din figura 173. Conectarea în serie mărește valoarea tensiunii de alimentare iar conectarea în paralel mărește valoarea curentului pe care îl poate debita alimentatorul.

## 5. DIODA ELECTROLUMINISCENTĂ (LED)

Când curentul trece printr-o joncțiune **p-n** direct polarizată, electronii liberi proveniți din regiunea **n** se recombina cu golurile în regiunea **p**. În acest fel ei trec de la un nivel energetic mai mare, corespunzător benzii de conducție, la un nivel energetic mai mic, corespunzător benzii de valență. Diferența de energie este eliberată sub formă de căldură și lumină. La unii semiconductori prevalează emisia termică. Acesta este cazul siliciului. Există alte materiale semiconductoare la care emisia de lumină este prevalentă. Dacă lumina emisă este în spectrul vizibil, aceste dispozitive se numesc diode electroluminiscente sau, prescurtat din limba engleză, **LED**. Ele sunt realizate pe baza unor combinații de galiu arsen și fosfor, GaAs, GaP și GaAsP. Față de diodele de siliciu, diodele electroluminiscente au o cădere de tensiune în conducție directă mai mare, de 2 până la 3V, în funcție de curentul care trece prin ele. De asemenea tensiunea inversă de străpungere este mai mică, aproximativ 5V. În figura 174 avem un montaj simplu de alimentare al unui LED. Dacă tensiunea de intrare este de 5V LED – ul va lumina. Dacă tensiunea de intrare este 0V LED – ul va fi stins. Valorile rezistențelor  $R_C$  și  $R_B$  vor fi determinate considerând căderea de tensiune pe LED de 2,5V și factorul de amplificare în curent al tranzistorului,  $\beta = 50$ .

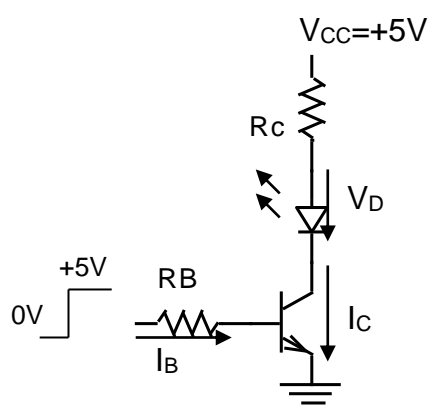


figura 174. Alimentarea LED – ului printr-un tranzistor.

Când tranzistorul este saturat curentul de colector se poate calcula cu relația:

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_D}{R_C} = \frac{2,5V}{R_C}$$

Curentul necesar pentru a aprinde LED-ul este uzual 20mA. Rezultă deci pentru rezistența de colector o valoare de 125Ω.

Curentul de bază necesar pentru 20mA curent de colector este:

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{20}{50} = 0,4mA$$

De aici rezultă valoarea rezistenței din bază:

$$R_B = \frac{5V - 0,7V}{0,4mA} = 10,75k\Omega$$

Practic se va folosi o rezistență de 10kΩ pentru bază și una de 120Ω sau 130Ω pentru colector.

Principalul dezavantaj al LED-urilor este consumul relativ mare de curent. Din acest motiv, în unele aplicații, ledul este alimentat în impulsuri. El se aprinde și se stinge de mii de ori într-o secundă dar datorită inerției ochiului lumina emisă este percepută ca fiind continuă. Intensitate luminii depinde în acest caz de valoarea medie a curentului prin LED adică de factorul de umplere al impulsurilor care comandă LED – ul.

O aplicație foarte populară a LED –urilor este afișajul cu 7 segmente. Fiecare segment este de fapt un LED, notat cu o literă de la **a** la **g**. Combinând în mod convenabil segmentele care luminează se poate afișa orice cifră de la 0 la 9. De exemplu pentru a afișa numărul 3 se aprind simultan LED-urile a,b,c,d și g.

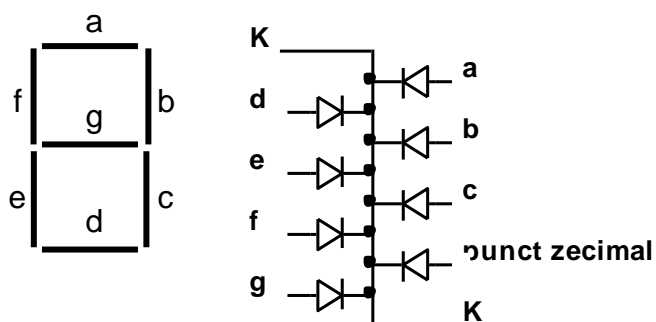


figura 175. Afișaj cu 7 segmente cu catodul comun

În figura 175 este prezentat un afișaj cu 7 segmente și punct zecimal realizat din 8 LED-uri cu catodul comun. Evident există afișaje la care anodul diodelor este comun.

## 6. OPTOCUPLORUL

Optocuplorul este o combinație realizată dintr-un LED și un fototranzistor sau alt dispozitiv fotosensibil cum ar fi fototriacul. Atunci când LED-ul este alimentat activează fototranzistorul care permite trecerea unui curent proporțional cu lumina dată de LED. Cum această lumină este la rândul ei proporțională cu curentul care trece prin LED, optocuploarele pot fi caracterizate de factorul de transfer în curent (CTR):

$$CTR(\%) = \frac{I_c}{I_d} \times 100$$

Valoarea acestui factor poate să difere foarte mult de la un optocuplor la altul. El poate lua valori de la  $0,1 \times 100\%$  până la câteva sute  $\times 100\%$  în cazul optocuploarelor realizate cu fotodarlington. De exemplu CTR pentru optocuplorul TIL117 la un curent de 20mA prin LED este de 100% dacă tensiunea colector emitor a fototranzistorului este 10V.

Un alt parametru important al optocuploarelor este **tensiunea de izolație**. Aceasta este diferența maximă de potențial dintre intrarea și ieșirea optocuplorului pentru care acesta asigură izolarea galvanică dintre intrare și ieșire. Ea este de

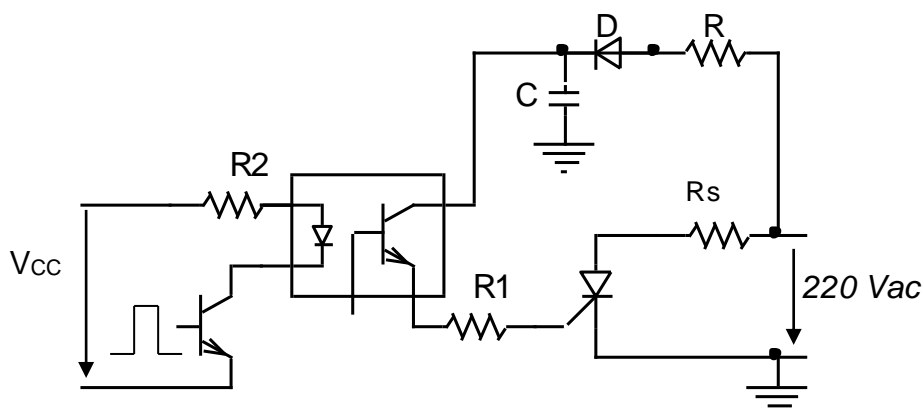


figura 176. Izolarea galvanică cu optocuplor

ordinul kilovolților. De exemplu ea este de  $\pm 1,5\text{kV}$  pentru optocuplorul TIL 111 și  $\pm 2,5\text{kV}$  pentru TIL 114, 116, 117.

Nu trebuie omis faptul că LED – urile în general au tensiune inversă de străpungere mică. Prin urmare tensiunea inversă aplicată la intrarea optocuploarelor nu poate depăși câțiva volți. Pentru optocuploarele TIL 111, 114, 116, 117 aceasta are valoarea de 3V. Timpul de răspuns al acestor optocuploare este de maximum  $10\mu\text{s}$  dar o valoare tipică este  $5\mu\text{s}$ .

Circuitul din figura 176 prezintă o aplicație tipică a optocuploarelor. El este de fapt versiunea cu optocuplor a circuitului din figura 171. Impulsul de comandă din baza tranzistorului poate să comande aprinderea tiristorului cu toate că nu există legătură electrică între circuitul tiristorului și circuitul tranzistorului. Comanda se transmite optic, prin optocuplor. În acest scop, rezistența  $R_2$  va fi astfel dimensionată încât:

$$I_D = \frac{V_{CC} - 2.5V}{R_2} \approx 20\text{mA}$$

Rezistența  $R_1$  va fi dimensionată astfel încât fototranzistorul să asigure în poarta tiristorului curentul necesar pentru amorsare,  $I_G$ . Grupul R – D – C este de fapt un redresor monoalternanță care asigură alimentarea cu tensiune pozitivă a fototranzistorului. Această tensiune,  $V$ , poate fi de ordinul zecilor de volți și împreună cu  $R_1$  trebuie să satisfacă relația:

$$\frac{V}{R_1} \geq I_G$$

Majoritatea optocuploarelor lucrează cu radiații infraroșii deoarece în cazul lor LED – ul nu este folosit pentru semnalizare sau afișare. Ele sunt de fapt niște traductoare electro – opto – electrice. Au atât semnalul de intrare cât și cel de ieșire electric dar informația se transmite de la intrare la ieșire pe cale optică.

## 7. TELECOMANDA ȘI TELEMETRIA

Dacă în cazul optocuploarelor, LED – ul și fototranzistorul sunt în aceeași capsulă principiul lui de funcționare este utilizabil și cu componente separate. În acest caz LED – ul și fototranzistorul se pot dispune la distanță unul de celălalt, realizându – se un sistem de telecomandă. Emițătorul este practic un LED cu radiații infraroșii. Receptorul are la intrare un fototranzistor care reconvertește aceste radiații în semnal electric.

Schema bloc a unui sistem de telecomandă se compune din două părți (figura 177).

Emițătorul de comenzi este de obicei alcătuit dintr-o tastatură care poate fi citită de un microcontroler. Acesta asociază unei taste apăsate un șir de impulsuri. Impulsurile comandă prin intermediul unui tranzistor unul sau mai multe LED – uri. Acestea vor emite trenuri de radiații infraroșii.

Receptorul comenzilor este o fotodiodă sau un fototranzistor. Sub incidența radiațiilor infraroșii aceasta își modifică curentul. Acest semnal este amplificat cu un amplificator – limitator. La ieșirea acestuia vom avea același tren de impulsuri care

au fost generate de microcontrolerul de la emițător. Un alt microcontroler preia

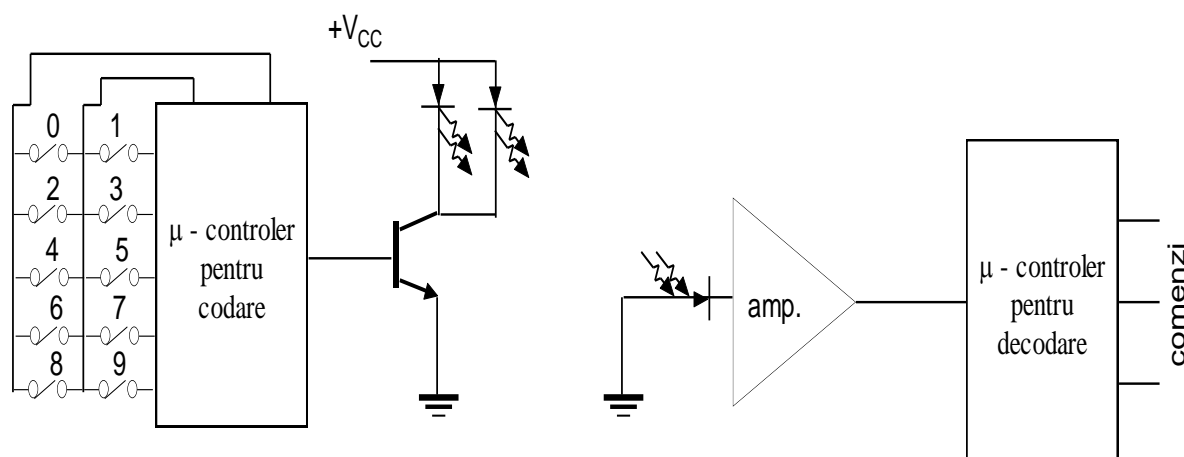


figura 177. Schema bloc a unui sistem de telecomandă

aceste impulsuri, le decodifică și generează comenzile corespunzătoare.

Distanța până la care se pot folosi telecomenzi este de ordinul metrilor sau al zecilor de metri. Distanța este mai mare dacă intensitatea radiației este mai mare. În acest scop curentul care trece prin LED este foarte mare. Pentru a nu distruge LED – ul, durata impulsurilor de comandă este foarte scurtă. Punerea în serie sau în paralel a mai multor LED – uri mărește distanța până la care se poate emite.

Recepția se poate face direct, atunci când radiațiile emise sunt focalizate cu un sistem optic și se transmit prin vizibilitate directă la receptor. Dar, deoarece radiațiile infraroșii se reflectă ca și lumina, receptorul poate să fie activat și de undele reflectate. Când între emițător și receptor nu există vizibilitate directă se poate realiza telecomandarea printr – o undă reflectată.

Pe principiul reflexiei se pot realiza teletetre. Acestea au aceeași structură ca și sistemul de telecomandă numai că emițătorul și receptorul sunt plasate în același loc. Telemetrul poate măsura distanța de la emițător la un obiect care reflectă radiațiile infraroșii. Emițătorul emite un tren de impulsuri luminoase care sunt reflectate de obiectul asupra cărora sunt îndreptate. Lumina reflectată este transformată în impulsuri de către receptor. Întârzierea semnalului recepționat este proporțională cu distanța  $d$  până la obiectul care reflectă lumina:

$$t = \frac{2d}{c}$$

unde  $c$  este viteza luminii. Măsurând timpul de întârziere se poate determina distanța. Telemetria cu radiații luminoase se poate utiliza la distanțe de ordinul zecilor de metri.