

FOTOREZISTENȚA

1. Scopul lucrării

Studiul fotoconducției în materiale semiconductoare.

2. Teoria lucrării

Conducția are loc datorită mișcării purtătorilor de sarcină (electroni și goluri). Prin fenomenul de fotoconducție se înțelege creșterea conducției unui material (metal, semiconductor) datorită generării de purtători de sarcină suplimentari sub influența radiației luminoase.

Printr-un semiconductor supus unei diferențe de potențial U va trece un curent electric slab (de întuneric), care crește, atunci când semiconductorul este iluminat, datorită fotoconducției. Intensitatea fotocurentului, diferită de cea a curentului de întuneric, depinde de temperatură, tensiunea electrică aplicată și de durata iluminării.

Conductibilitatea electrică totală σ_t este datorată electronilor (de concentrație n) și golurilor (de concentrație p), și având mobilitățile μ_n , respectiv μ_p .

$$\sigma_t = e\mu_n n + e\mu_p p$$

La întuneric conductibilitatea se datorează purtătorilor de sarcină de echilibru (electroni de concentrație $n = n_0$ și goluri de concentrație $p = p_0$), conductibilitatea totală fiind numită și conductibilitatea de întuneric σ_0 .

$$\sigma_{t|\text{întuneric}} = \sigma_0 = e\mu_n n_0 + e\mu_p p_0$$

Prin iluminare, concentrația de electroni crește de la n_0 la n , iar cea de goluri de la p_0 la p .

$$\sigma_{t|\text{iluminare}} = e\mu_n n + e\mu_p p = e\mu_n (n_0 + n - n_0) + e\mu_p (p_0 + p - p_0) = \sigma_0 + \sigma_f \quad (1)$$

Unde σ_f este conductibilitatea datorită iluminării, sau fotoconductibilitatea, datorată creării excesului de purtători Δn , respective Δp . Din (1) fotoconductibilitatea este

$$\sigma_f = \sigma_t - \sigma_0 = e(\mu_n \Delta n + \mu_p \Delta p) \quad (2)$$

Intensitatea curentului electric de fotoconducție (fotorăspuns) este direct proporțională cu numărul total de fotoni absorbiți (G) în volumul probei semiconductoare luminate și cu sarcina electronului. Factorul de proportionalitate A' se numește "coeficient de amplificare" de conducție, deci

$$\Delta I_L = A' G e \quad (4)$$

unde:

$$G = \alpha S d \Phi_L \quad (5)$$

Fotorezistențele utilizate în practică sunt fabricate din materiale semiconductoare fotosensibile a căror conductibilitate de întuneric este mult mai mică decât fotoconductibilitatea, $\sigma_0 \ll \sigma_f$. În acest caz fotocurentul este direct proporțional cu tensiunea aplicată U și cu fluxul luminos Φ_L , adică:

$$\Delta I_L = CU\Phi_L, \quad (6)$$

C fiind constanta dispozitivului experimental. Această comportare a condus la utilizarea fotorezistențelor în circuite optoelectronice și de automatizare.

Studiul fotoconducției semiconductorilor se face mai ales pe strate subțiri cu grosimi de ordinul mm deoarece în comparație cu probele masive, prezintă următoarele avantaje:

- Rezistență electrică este mare, variația ei la iluminare fiind mai ușor de măsurat;
- Se înlătură posibilitatea variației suplimentare a rezistenței prin încălzire;
- Stratul subțire poate fi activat prin iluminare în toată grosimea sa, funcție de parcursul fotonilor incidenți în materialul respectiv;
- Procesul de impurificare se poate realiza mai ușor, fapt important deoarece impurificarea produce o deplasare a maximumului fotorăspunsului spre lungimi de undă din domeniul vizibil (pentru care distanța de pătrundere a fotonilor în probă este mai mare). Acest lucru este exemplificat în Fig. 1, unde este prezentat răspunsul pentru un strat fotorezistor de CdS și un fotorezistor de CdS impurificat cu Cu.

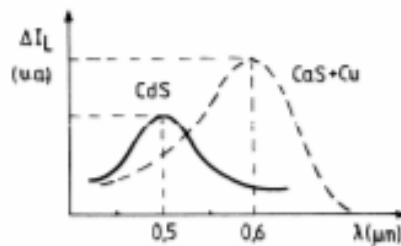


Fig. 1. Răspunsul unui fotorezistor de CdS pur și impurificat cu Cu

3. Metoda experimentală folosită

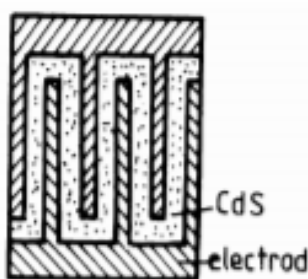


Fig. 2. Schema fotorezistenței

Fotorezistența studiată este un strat subțire (2-3 mm) de CdS impurificat cu atomi de Cu. Cei doi electrozi metalici (vezi Fig. 2) sunt obținuți pe placuța de sticlă folosind evaporarea termică in vid. Prin același fenomen de evaporare, peste ei se depun atomii de Cu. Fotorezistență și sursa de lumină nu prea intensă (12W) îndeplinesc condițiile ca relația (6) să fie satisfăcută. În această lucrare se va urmări modul cum variația fotocurentului în funcție de tensiunea aplicată și de iluminarea E .

Tensiunea prin circuitul electric este direct proporțională cu rezistența din circuit: $U = R \cdot I$. Ca urmare, graficul intensității funcție de tensiunea din circuit va fi o dreaptă: $I = U \cdot I/R$.

4. Montajul experimental

Pentru studiul caracteristicilor fotorezistenței se utilizează un montaj potențiometric, prezentat în Fig 3.

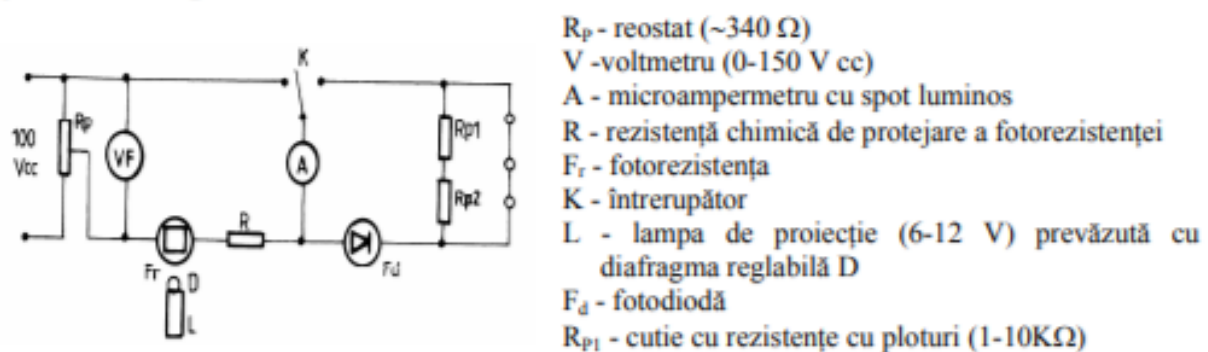


Fig. 3: Schița dispozitivului experimental

Alimentarea generală cu curent electric se face de la blocul de prize, la tensiunea de 220Vca. Tensiunea electrică continuă, necesară alimentării circuitului fotorezistenței se obține cu ajutorul redresorului aflat lângă masa de lucru. Reostatul (R_p), montat potențiometric, permite variația tensiunii aplicate, valoarea ei fiind indicată de voltmetrul V. L reprezintă sursa de lumină albă, iar A este un microampermetru cu spot luminos.

5. Modul de lucru

a. După recunoașterea aparatelor, efectuarea și verificarea schemei de montaj (Fig. 5), se conectează montajul la blocul de prize.

Se potrivește comutatorul “Fotorezistență/Fotodiodă” pe poziția “Fotorezistență”. Pentru asigurarea protecției aparatelor, înainte de conectarea la blocul de prize, trebuie să se verifice ca:

- microampermetrul (A) să fie pus pe poziția de măsurare a intensității maxime prin comutatorul de scală, iar spotul să fie pe poziția blocat;
- cursorul reostatului (R_p) să fie adus la poziția de rezistență electrică maximă (căderea de tensiune minimă pe fotorezistență)
- diafragma D care obturează fascicolul de lumină să fie deschisă pe poziția 1 (iluminare slabă)

b. Se manevrează cursorul reostatului (R_p) pentru a stabili o tensiune de 20V și se îndreaptă sursa de lumină pe o direcție normală pe suprafața fotorezistenței, având indicatorul diafragmei pe poziția 1 (iluminarea E_1). Se blochează spotul microampermetrului și pentru iluminarea E_1 , proporțională cu fluxul incident, se citește intensitatea fotocurentului în diviziuni care se convertesc în microamperi, conform scării utilizate.

c. Menținând E_1 constant, se modifică valorile tensiunii $U = 20, 40, \dots, 100V$ și se citește, ca la punctul (2), fotocurentul de fiecare dată.

(Dacă se efectuează și lucrarea “Fotodioda”, se vor considera doar cinci valori ale tensiunii: 20, 40, ..., 100, și cinci valori ale rezistenței iluminării E : 2, 4, ..., 10.)

d. Se repetă operațiile de la punctele (2) și (3) variind iluminarea prin deschiderea treptată a diafragmei (trecând prin pozițiile 2, 3, ... ,10); toate datele și rezultatele măsurătorilor se înscriu într-un tabel de forma:

Nr. crt.	E_i (u. r.)		E_1	E_2	E_5	Obs. u. r. = unități relative
	U_j (V)						
1	20		I_{ij}				
2	40						
.	..					→	$I_{ij}(E_i)$ la $U_j = \text{ct.}$
5	100				↓		
					$I_{ij}(E_i)$ la $E_i = \text{ct}; R_i$		

e. După efectuarea tuturor măsurărilor se face deconectarea tuturor aparatelor de la sursele de alimentare, în ordinea inversă operațiilor de la punctul 2; se readuc astfel toate aparatele la poziția inițială și apoi se deconectează de la blocul de prize.

6. Prelucrarea rezultatelor experimentale

Se trasează, pe hârtie milimetrică, două familii de grafice:

1) Caracteristicile curent - tensiune $I_{ij} = I_{ij}(U_j)$, $i=1 - 5$, $j = 1 - 6$ la iluminare (E_i) constantă, pentru fiecare iluminare în sens crescător a acesteia. Pe porțiunile liniare ale acestor caracteristici se poate calcula rezistența electrică a probei, conform legii Ohm

$$R_i = \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (7)$$

Cu rezistența calculată pentru diversele iluminări se trasează graficul $R_i = R_i(E_i)$.

Din relația (6) se poate determina constanta C a dispozitivului, pentru un anumit domeniu de tensiuni.

2) Caracteristicile curent - iluminare $I = I(E)$ la $U = \text{ct.}$, pentru fiecare tensiune aplicată;

FOTODIODA

1. Consideratii generale

Este cunoscut faptul ca daca un semiconductor este iluminat apare o forta fotoelectromotoare numai in urmatoarele doua cazuri:

1. daca semiconductorul este iluminat neuniform
2. daca in semiconductorul iluminat exista un camp electric, magnetic, gradient de impuritati sau un gradient de temperatura.

In situatii reale, fiecare din aceste posibilitati influenteaza mai mult sau mai putin efectul global masurat. Este interesant de studiat tensiunea fotoelectromotoare produsa numai de una din cauzele de mai sus si nu un efect suma. In primul caz, cand semiconductorul este iluminat neuniform, avem de a face cu efectul Dember, iar in cazul cand semiconductorul este iluminat uniform in camp magnetic obtinem efectul fotoelectromagnetic.

Discutăm în prezent numai de comportarea unui semiconductor iluminat in care exista un camp electric intern cauzat de prezenta gradientilor impuritatilor donoare si acceptoare. Daca este iluminata regiunea n a jonctiunii p-n atunci in vecinatatea suprafetei se vor crea perechi electron-gol a caror concentratie va scadea treptat spre interiorul semiconductorului. Sa presupunem ca stratul de baraj al jonctiunii se afla la o distanta comparabila cu lungimea de difuzie a putatorilor. In acest caz perechea electron-gol intand in campul intern al stratului de baraj va fi separata. Electronii vor fi dirijati spre regiunea n a jonctiunii iar golurile spre regiunea p. Prin urmare echilibrul termodinamic al jonctiunii este perturbat, iar acest lucru se materializeaza prin aparitia unei diferente de potential care cauzeaza trecerea unui curent prin circuitul exterior al fotoelementului.

2. Teoria efectului fotoelectric in jonctiunea p-n

Teoria efectului fotoelectric in jonctiunea p-n a fost facuta de Cummerow care pentru a calcula caracteristica curent-tensiune in functie de radiatia incidenta a facut urmatoarele ipoteze:

- grosimea stratului de baraj "2d" este mica in comparatie cu l_p si l_n (grosimile regiunilor p si respectiv n), cat si in comparatie cu lungimile de difuzie ale electronilor L_n si golurilor L_p ;
- campul electric in afara stratului de baraj este mic asa ca poate fi neglijat;
- concentratiile golurilor in regiunea p si ale electronilor in regiunea n sunt mici, asa ca peste tot se poate folosi statistica Boltzmann (nedegenerare).

Jonctiunea p-n este considerata plana asa ca problema poate fi tratata in cazul unidimensional. Se ilumineaza regiunea p a jonctiunii normal pe planul jonctiunii. Curentul total I , care este constant pe lungimea fotoelementului, se poate scrie ca fiind suma curentilor de electroni I_n si goluri I_p in oricare sectiune perpendiculara pe directia x. In sectiunea $x=0$ (planul jonctiunii) vom avea:

$$I = I_p(0) + I_n(0) \quad (1)$$

Conform ipotezelor facute $I_p(0)=I_p(d)$ si $I_n(0)=I_n(d)$ si deci putem scrie:

$$I=I_p(d)+I_n(-d) \quad (2)$$

A doua ipoteza conduce la relatiile:

$$I_n(-d) = q \times D_n \times (dn/dx)_{x=d} I_p(d) = -q \times D_p \times (dp/dx)_{x=d} \quad (3)$$

unde D_n si D_p sunt coeficientii de difuzie a electronilor si respectiv golurilor iar q este sarcina electronului. Prin urmare, pentru a calcula curentii trebuie sa cunoastem distributia purtatorilor de neechilibru pe lungimile regiunilor n si p .

Folosind ecuatiile de conservare a numarului de goluri, putem scrie urmatoarea ecuatie diferentiale pentru concentratia golurilor din regiunea n , in regim stationar:

$$d^2p/dx^2 - p/L_p^2 = - p_n / L_p^2 - g(x) \times t_p / L_p^2 \quad (4)$$

unde p_n este concentratia de echilibru a golurilor din regiunea n , $g(x)$ este numarul de goluri creat de lumina in unitatea de timp si volum iar t_p este timpul de viata al golurilor. Aceasta ecuatie se rezolva folosind urmatoarele conditii la limita:

$$p=p_n, \text{ pentru } x=l_n$$

$$p=p_n \exp (qU/kT) \text{ pentru } x= d$$

Daca pe unitatea de suprafata a regiunii p la $x = -l_p$ cad in unitatea de timp H_s cuante si fiecare cuanta creaza un electron atunci putem scrie:

$$g(x) = (H_s / L_1) \times \exp[- (l_p + x) / L_1]$$

unde $(1/L_1)$ este coeficientul de absorbtie a luminii. Prin urmare, ecuatiile diferentiale (4) se poate transcrie astfel:

$$d^2p/dx^2 - p/L_p^2 = - [H_s / (L_1 \times D_p)] \times \exp[- (l_p+x)/L_1] - p_n / L_p^2 \quad (5)$$

Solutia acestei ecuatii cu conditia la limita (5) este,

$$p=\{p_n \times \exp[2 \times U/(kT)] - p_n \times A \times \exp(- l_p / L_1)\} \times \exp(- x/L_p) + A \times \exp[- (l_p + x)/L_1] + p_n \quad (6)$$

unde

$$A = H_s \times L_1 \times L_p^2 / [D_p \times (L_1^2 - L_p^2)]$$

O expresie analoaga se poate gasi si pentru concentratia electronilor in regiunea p . Folosind aceste ecuatii si relatiile (2) si (3) pentru curentul total care trece prin jonctiune obtinem urmatoarea expresie:

$$I = q \times (e^{qU/(kT)} - 1) \times (g_p \times L_p' + g_n \times L_n') - q \times g_o \times (L_1 + L_2) \quad (7)$$

unde: $g_n = n_p / j_n$ si $g_p = n_n / j_p$ reprezinta vitezele de generare termica a purtatorilor iar L_p este lungimea de difuzie efectiva a golurilor in regiunea n a jonctiunii si este data de expresia:

$$L_p' = L_p \times \text{tg}(l_n / L_p) \quad (8)$$

In cazul cand $l_n \gg L_p$ se poate scrie ca $L_p' @ L_p$ g_o este viteza de generare optica a perechilor electron-gol in punctul $x=0$ si este data de formula:

$$g_o = (H_s / L_1) \times \exp(- l_p / L_1) \quad (9)$$

L_1 este adancimea efectiva unde are loc generarea de perechi electron-gol sub actiunea luminii in regiunea n a jonctiunii p-n si este data de:

$$L_1 = (L_p/L_1) \times [1 - \text{sech}(l_n/L_p) \times \exp(-l_n/L_1) - \text{th}(l_n/L_p)] \times L_p \times L^2 / (L_p^2 - L_1^2) \quad (10)$$

O expresie analoaga se poate scrie si pentru L_2 . Introducand notatiile:

$$q \times g_p \times L_p = I_{ps}, \quad q \times g_n \times L_n = I_{ns}, \quad q \times g_0 \times (L_1 + L_2) = I_L$$

obtinem formula finala pentru caracteristica curent-tensiune a fotoelementului:

$$I = (I_{ps} + I_{ns}) \times (e^{qU/(kT)} - 1) - I_L \quad (11)$$

Primul termen din (11) coincide cu caracteristica curent-tensiune a unei jonctiuni p-n la intuneric. Al doilea termen din (11) este proportional cu intensitatea radiatiei incidente si reprezinta fotocurentul.

Trebuie subliniat faptul ca efectele de suprafata pot influenta considerabil functionarea fotoelementelor. Pentru a lua in considerare in calculele facute mai sus efectele de suprafata ar trebui modificata conditia la limita (5) astfel:

$$(D_p \times dp/dx)_{x=l_n} = -s \times (p - p_n)_{x=l_n} \quad (12)$$

unde s este viteza de recombinare la suprafata. Aceasta conditie la limita inseamna ca are loc un proces suplimentar de recombinare datorita difuziei purtatorilor spre suprafata. O conditie analoaga trebuie folosita si pentru $x=l_p$. In final se obtine o formula de tipul (7) unde marimile L_p, L_n, L_1 si L_2 vor contine si vitezele de recombinare pe cele doua suprafete ale fotoelementului.

3. Schema echivalenta a fotoelementelor

Folosind rezultatele teoretice de mai sus, putem asocia unui fotoelement o schema echivalenta care sa dea aceeasi caracteristica curent-tensiune. Schema echivalenta simpla care descrie functionarea unui fotoelement la iluminarea continua este prezentata in figura 1.

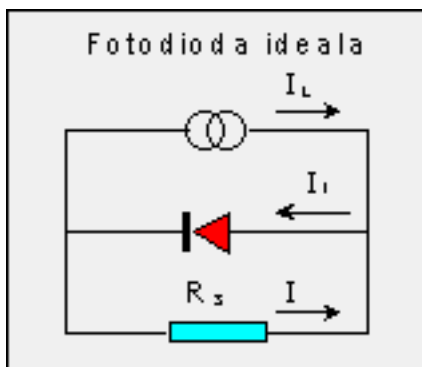


Figura 1. Schema echivalenta a fotodiodei.

Actiunea luminii asupra fotoelementului este luata in coniderare in aceasta schema prin introducerea sursei de curent I_L a carei marime este determinata de intensitatea si compozitia spectrala a radiatiei incidente. Marimea I_L este egala cu curentul efectiv de electroni si goluri create de lumina si care nu au reusit sa recombine pana la procesul de separare din stratul de baraj. Recombinarea perechilor de electroni si goluri create de lumina este reprezentata in schema prin introducerea barierei inactive fotoelectric prin care trece curentul I_1 . In circuitul exterior prin rezistenta de sarcina R_s trece curentul I . Din aceasta schema se poate observa ca:

$$I = I_1 - I_L \quad (13)$$

Daca U este tensiunea pe rezistenta de sarcina si implicit pe stratul de baraj atunci:

$$I_1 = I_{s \times} (e^{qU/(kT)} - 1) \quad (14)$$

In cazul unei jonctiuni p-n abrupte pentru I_s se obtine expresia:

$$I_s = (k \times T/q) \times [b \times s_i^2 / (1 + b^2)] \times (r_n / L_n + r_p / L_p) \times S \quad (15)$$

unde s_i este conductibilitatea semiconductorului intrisec, b este raportul mobilitatilor, r sunt rezistivitatile regiunilor n si respectiv p ale jonctiunii, L_n si L_p sunt lungimile de difuzie ale electronilor si respectiv golurilor iar S este suprafata jonctiunii.

Din (13) si (14) se poate obtine formula:

$$I = I_{s \times} (e^{qU/(kT)} - 1) - I_L \quad (16)$$

care reprezinta familia de caracteristici curent-tensiune a fotoelementului, parametru fiind intensitatea radiatiei incidente.

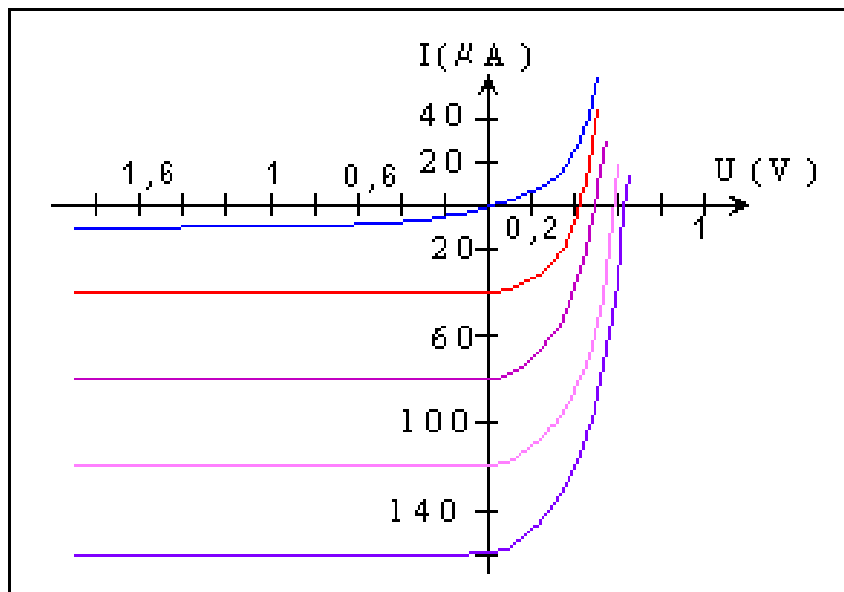


Figura 2. Caracteristica curent-tensiune a fotodiodei la diverse iluminari.

In figura 2 este prezentata o familie de caracteristici curent-tensiune, a unui fotoelement din Si pentru diferite intensitati ale radiatiei incidente. Curba care trece prin originea axelor de coordonate corespunde lui $I_L = 0$ (lipsa iluminarii).

Din figura 2 putem observa ca, odata cu cresterea intensitatii radiatiei incidente, caracteristicile curent-tensiune se deplaseaza in jos si ca in cadranul IV al sistemului de axe apar portiuni de caracteristici curent-tensiune. Pe aceste portiuni, jonctiunea p-n iluminata se comporta ca o sursa de curent iar circuitul exterior ca o rezistenta de sarcina. Diferite puncte ale caracteristicilor situate in cadranul IV corespund diferitelor rezistente de sarcina. Punctul unde caracteristica taie axa tensiunilor corespunde rezistentei de sarcina $R_s = ?$, iar cel unde taie axa curentilor lui $R_s = 0$.

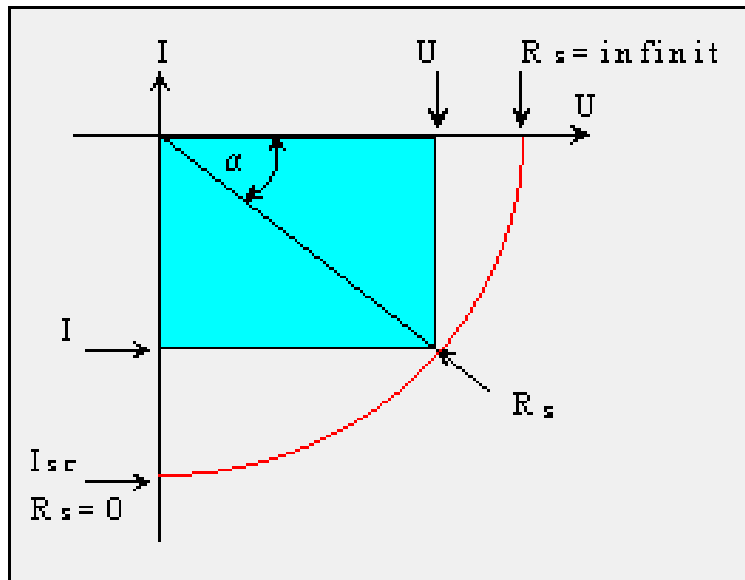


Figura 3. Elementele importante ale caracteristici I-V din cadranul 4.

In figura 3 este aratata portiunea de caracteristica curent-tensiune discutata mai sus si care nu reprezinta altceva decat portiunea de sarcina a fotoelementului **in care functioneaza ca transformator al energiei luminoase in energie electrica**. Daca fotoelementul este scurtcircuitat ($R_s=0$) atunci in circuit se stabileste curentul I_{sc} a carui marime este determinata de calitatea fotoelementului si intensitatea radiatiei incidente.

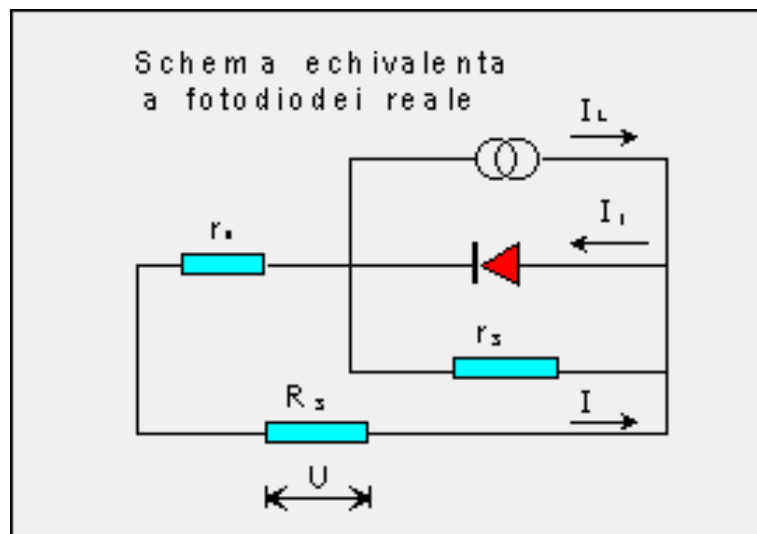


Figura 4. Schema echivalenta reala (completa) a fotodiodei.

Analiza facuta mai sus, rezulta din schema echivalenta simpla a fotoelementului din figura 1 care nu tine seama de existenta rezistentei serie a jonctiunii p-n, de rezistenta contactelor sau de rezistenta de scurgere. In figura 4 este prezentata schema echivalenta reala a unui fotoelement iar r_d este rezistenta serie a jonctiunii p-n. In acest caz caracteristica curent-tensiune a fotoelementului are urmatoarea forma:

$$\ln[(I + I_1)/I_s - (U - I \times r_d) / (I_s \times r_s)] = q \times (U - I \times r_d) / (k \times T) \quad (17)$$

care se poate deduce usor din schema echivalenta (fig. 4).

Pentru fotoelemente se mai defineste **sensibilitatea integrala** care este raportul dintre diferenta curentilor la lumina si intuneric exprimata in mA si valoarea fluxului de lumina cu compozitia spectrala corespunzatoare radiatiei wolframului incalzit la 2840 K, exprimat in lumeni. Aceasta definitie presupune implicit ca

sensibilitatea fotoelementului nu depinde de intensitatea fluxului luminos sau ca fotocurentul variaza liniar cu fluxul incident. Acest fapt este valabil numai in cazul iluminarilor slabe cand rezistenta stratului de baraj ramane mai mare decat rezistenta serie a fotodiodei. O alta cauza a neliniaritatii fotocurentului in functie de intensitatea luminii la intensitati mari consta in aceea ca timpul de viata al purtatorilor minoritari depinde de nivelul injectiei (in cazul de fata de intensitatea luminii).

4. Instalatia experimentală

In instalatia experimentală se masoara tensiunea fotoelectromotoare si caracteristicile curent-tensiune la intuneric si diferite intensitati ale radiatiei incidente. Tensiunea fotoelectromotoare se poate gasi din (16) facand $I=0$ si deci vom avea:

$$U_f = (k \times T/q) \times \ln(1 - I_L / I_s) \quad (18)$$

Daca se introduce o rezistenta de sarcina R_s in serie cu fotodioda atunci va trece un curent $I = - U_f / R_s$ si deci din (16) obtinem:

$$I_L - I_s \{ \exp[q \times U_f / (k \times T)] - 1 \} = U_f / R_s \quad (19)$$

Ecuatia (19) descrie functionarea fotoelementelor atunci cand ele functioneaza ca transformatoare de energie luminoasa in energie electrica.

Daca fotoelementul este polarizat invers cu tensiunea atunci (19) se modifica astfel:

$$I_L - I_s \{ \exp[q \times (U_f - U) / (k \times T)] - 1 \} = (U_f - U) / R_s \quad (20)$$

Expresia (20) reprezinta ecuatia fundamentala a fotoelementului in regim de fotodioda. La tensiuni inverse mari $I @ I_L + I_s$, iar pentru tensiuni directe $U > U_f$ obtinem ecuatia obisnuita a unei jonctiuni p-n.

Tensiunea fotoelectromotoare se masoara cu ajutorul unui voltmetru digital cu rezistenta de intrare mare, pentru diferite intensitati ale radiatiei incidente. Conectand fotodioda in serie cu o sursa de tensiune U reglabila si cu o rezistenta de sarcina R_s reglabila se poate ridica caracteristica curent-tensiune.

Daca tensiunea inversa aplicata fotodiodei este suficient de mare astfel incat curentul invers sa intre in regiunea de saturatie, atunci masurand tensiunea cu ajutorul voltmetrului pe o rezistenta cunoscuta putem determina marimea $I_s + I_L$ cand fotoelementul este iluminat si I_s cand este la intuneric. Practic, pentru determinarea marimilor I_s si I_L , se ridica caracteristicile curent-tensiune la intuneric si la diferite intensitati ale radiatiei incidente, iar portiunile de saturatie ale curentilor se extrapoleaza la $U=0$.

Scopul lucrării consta in verificarea principalelor caracteristici ale fotoelementelor folosind procedura descrisa mai jos.

1. Se masoara tensiunea fotoelectromotoare pentru diferite intensitati ale radiatiei incidente. Se construiesc graficul $U_f = f(1/d^2)$ unde d este distanta de la sursa de lumina pana la fotodioda. Sa se explice rezultatul.
2. Fara sursa de tensiune in circuit se masoara tensiunea fotoelectromotoare de pe rezistenta de sarcina R_s pentru diferite valori ale acesteia. Se face graficul $U_f = f(R_s)$ pentru doua intensitati ale radiatiei incidente.

3. Se ridica caracteristicile curent-tensiune la intuneric si pentru diferite intensitati ale radiatiei incidente. Din rezultatele obtinute sa se gaseasca I_s si I_L si sa se verifice relatia (18). In acest scop pentru fiecare intensitate a luminii incidente trebuie masurata si tensiunea fotoelectromotoare.
4. Se ridica caracteristica lux-amper a fotoelementului masurand fotocurentul pentru diferite distante ale sursei de lumina pana la fotodiada. Se va trasa graficul $I_L = f(F/d^2)$ unde F este fluxul luminos incident corespunzator sursei folosite si care se va da in laborator.