

*Lucrarea nr. 20.*

## **STUDIUL CARACTERISTICII CURENT-TENSIUNE A UNEI CELULE SOLARE**

### **1. Scopul lucrării**

Scopul acestei lucrări este determinarea parametrilor unei celule solare din caracteristica sa curent – tensiune.

### **2. Teoria lucrării**

#### **2.1. Conversia energiei radiației solare în energie electrică.**

##### **Considerații generale.**

Dispozitivele optoelectronice sunt dispozitivele care pot transforma, prin intermediul proceselor electronice, energia luminoasă în semnale electrice, precum și energia electrică în radiație luminoasă. Constructiv, aceste dispozitive sunt realizate cu structuri semiconductoare.

După modul de conversie radiație luminoasă-semnal electric, sau energie electrică-radiație luminoasă, se deosebesc două grupe importante de dispozitive optoelectronice. Prima grupă include dispozitivele care transformă energia radiației luminoase în semnale electrice. Dacă prin acest proces se urmărește punerea în evidență și măsurarea radiației luminoase incidente, dispozitivele se numesc **fotodetectori**; dacă energia radiației luminoase este suficient de mare și în urma procesului de conversie se urmărește obținerea de energie electrică, dispozitivele se numesc **celule fotovoltaice**, respectiv **celule solare** dacă radiația incidentă este chiar radiația solară. În cea de a doua grupă sunt incluse dispozitivele care transforma energia electrică în radiație luminoasă. Două tipuri

de dispozitive din aceasta categorie sunt larg răspândite: **dispozitivele electroluminiscente și laserii cu joncțiuni semiconductoare.**

Procesele fizice care stau la baza funcționării dispozitivelor optoelectronice sunt generarea și recombinarea de purtători mobili de sarcină electrică.

În cazul fotodetectorilor și al celulelor fotovoltaice sunt dominante procesele de generare a purtătorilor de sarcină sub influența radiației incidente. Dispozitivele electroluminiscente și laserii cu joncțiuni au ca proces principal recombinarea radiativă a purtătorilor mobili de sarcină în exces, creați prin diferite metode.

Celulele solare sunt dispozitive semiconductoare de conversie cuantică directă a energiei solare în energie electrică. Toate celulele solare au același principiu de funcționare, deoarece sunt construite dintr-un strat semiconductor numit bază (tip-p de exemplu), pe a cărei primă față se depune un contact chimic (CO), iar pe cea de a doua față se depune un alt material (tip-n de exemplu fig. 1) în vederea stabilirii unei bariere de potențial (fig. 2) care să realizeze o joncțiune p-n.

Se numește homojoncțiune joncțiunea p-n din fig. 1 care se realizează utilizând același material semiconductor și, respectiv, heterojoncțiune dacă pe baza semiconductoră se depune un material semiconductor diferit de cel al bazei. Pe cel de al doilea material se aplică o grilă metalică pentru a realiza cel de al doilea contact ohmic, de rezistență serie minimă, și pentru ca o mai mare parte a radiației solare să poată pătrunde în celulă.

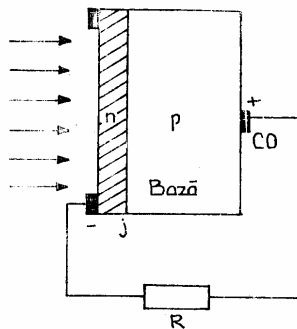


Fig. 1

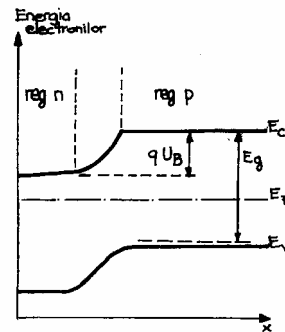


Fig. 2

Pentru a elimina pierderile de energie solară incidentă și pentru protecția împotriva agenților externi se aplică peste grilă un material antireflector. Celula solară este închisă într-o capsulă din sticlă sau din material plastic transparent.

Întrucât parametrii principali de funcționare ai unei celule solare sunt în general parametrii celulei fotovoltaice cu joncțiune p-n, în cele ce urmează va fi descrisă celula fotovoltaică (pe bază de Si).

## **2.2. Celula fotovoltaică. Structură, principiu de funcționare.**

Celula fotovoltaică transformă energia radiației luminoase direct în energie electrică cu un randament  $\eta = 5 - 20\%$ .

Energia radiantă este absorbită de către substanță prin intermediul fotonilor. Sursa de radiații poate fi orice sursă de fotoni, ca: radiația solară, lămpi incandescente, surse de raze X.

Absorbția radiației incidente pe un material cauzează apariția unei diferențe de potențial între două porțiuni ale materialului, dacă această absorbție se produce în vecinătatea unei bariere de potențial. O astfel de barieră de potențial poate să apară în următoarele condiții:

- într-o homojoncțiune p-n, prin diferența dintre conductivitățile electrice de volum între cele două părți ale materialului.
- la contactul metal-semiconductor.
- datorită diferenței dintre conductivitatea electrică superficială și cea de volum a materialului.
- într-o heterojoncțiune p-n formată din doi semiconductori cu energiile benzilor interzise diferite.

Mecanismul generării unei tensiuni fotovoltaice constante într-un circuit electric constă în generarea prin fotoionizare a unor purtători de sarcină de același tip cu cei majoritari.

Fie celula fotovoltaică cu joncțiunea p-n din Si conform fig. 3.a. Regiunile hașurate sunt puternic dopate în scopul micșorării rezistenței ohmice de volum.

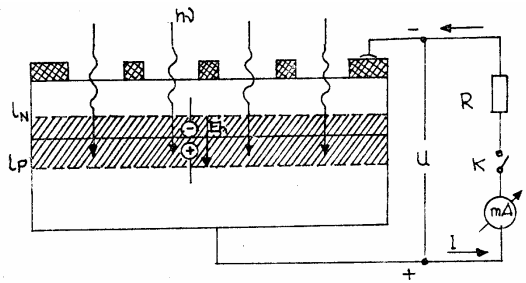


Fig. 3.a

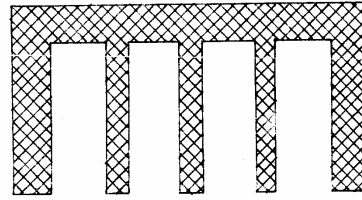


Fig. 3.b

Regiunea  $n$  expusă radiației este foarte subțire, astfel încât radiația luminoasă este absorbită în principal de regiunea sărăcită. Contactul ohmic al regiunii  $n$  se realizează fie sub forma unei pelicule metalice transparente, fie sub forma unor benzi metalice fig. 3.b.

Principiul de funcționare al celulei fotovoltaice poate fi urmărit în fig. 3.a. Presupunem că pe celulă nu este aplicată o tensiune externă, iar între terminale este conectat rezistorul de sarcină  $R$  (contactul  $k$  este închis). Prin aplicarea radiației luminoase are loc procesul de generare de perechi electron-gol în regiunea sărăcită sau în imediata ei vecinătate: sub acțiunea câmpului electric de barieră electronii sunt deplasați spre regiunea  $n$ , iar golurile spre regiunea  $p$ . Această acumulare de sarcină dă naștere unei diferențe de potențial  $U$  la terminalele celulei.

Diferența de potențial  $U$  are semn opus față de potențialul de barieră, prin urmare acțiunea radiației luminoase poate fi echivalentă cu aplicarea unei tensiuni externe directe.

Modelul benzilor de energie în prezența radiației luminoase este prezentat în fig. 2.

Dacă pe celula fotovoltaică este aplicată radiația luminoasă, atunci la bornele ei apare o tensiune  $U$ , care acționează ca o tensiune de polarizare directă a joncțiunii. În aceste condiții prin joncțiune trece un curent de forma:

$$I = Id - I_f = I_s \left( e^{\frac{eU}{KT}} - 1 \right) - I_f \quad (1)$$

unde  $I_s$  este curentul determinat de fluxul purtătorilor minoritari la echilibru termic și în absența polarizării, iar  $I_f$  reprezintă curentul cauzat de radiația incidentă (fotocurentul) a cărui valoare este determinată de intensitatea fluxului incident.

În condițiile unui circuit deschis (mers în gol),  $R = \infty, I = 0$ , pentru tensiune se obținem expresia:

$$U_0 = \frac{KT}{e} \ln \left( 1 + \frac{I_f}{I_s} \right) \quad (2)$$

În condiții de scurtcircuit,  $R = 0$ , prin conductorul exterior care unește terminalele trece un curent de scurtcircuit:

$$I_{sc} = -I_f \quad (3)$$

În lipsa iluminării se obține curentul de întuneric pentru  $I_f = 0$

$$I_f = I_d = I_s \left( e^{\frac{eU}{KT}} - 1 \right) \quad (4)$$

Cei doi parametri fundamentali, curentul  $I_{sc}$  și tensiunea  $U_0$ , depind în mod diferit de nivelul de iluminare, de mărimea ariei fotosensibile și de temperatură.

Relația (1) constituie expresia analitică a caracteristicii statice.

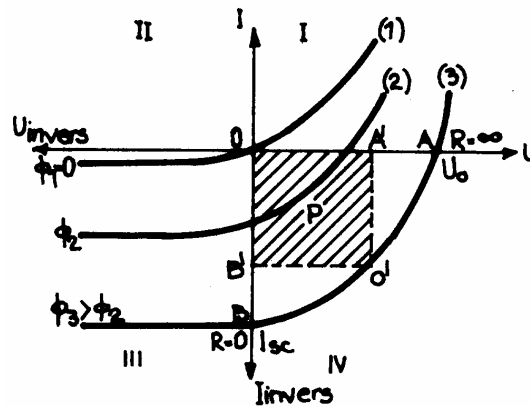


Fig. 4.

Caracteristica curent-tensiune a unei celule fotovoltaice în absența radiației incidente, așa cum rezultă din relația (1) - coincide cu cea a unei joncțiuni p - n obișnuite, iar la iluminare se deplasează cu mărimea  $I_f$  spre axa negativă a curenților (fig. 4).

## 2.2. Determinarea parametrilor celulei solare din caracteristica $I - U$

**a) Tensiunea în circuit deschis  $U_0$**  - corespunde punctului de intersecție al curbei  $I - U$  cu axa tensiunii. Valoarea tensiunii  $U_0$  nu este afectată de aria suprafeței celulei.

**b) Curentul de scurtcircuit** - corespunde punctului de intersecție între curba  $I - U$  și axa curentului.

**c) Puterea maximă** debitată de celulă corespunde valorilor punctului  $M$ , unde aria dreptunghiului marcat pe grafic între curba și axele de coordonate este maximă  $P_{\max} = U \cdot I / M$ . Punctul  $M$  trebuie să se găsească la mijlocul segmentului de dreaptă delimitat de tangenta la curbă și axele de coordonate  $I - U$  (fig. 5).

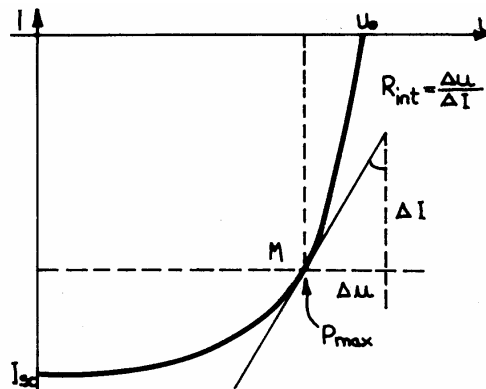


Fig. 5.

**d) Randamentul energetic** este dat de raportul între puterea maximă la ieșire și intensitatea radiației incidente,  $E_v$ , pe celulă, multiplicată cu aria  $A$  a suprafeței utile a celulei:

$$\eta = \frac{P_{\max}}{E_v \cdot A} \cdot 100 \quad (5)$$

**e) Factorul de umplere** sau factorul de curbura este definit ca raportul între puterea maximă și produsul între tensiunea în gol  $U_0$  și curentul de scurtcircuit  $I_{sc}$

$$F = \frac{P_{\max}}{U_0 I_{sc}} \cdot 100. \quad (6)$$

Acest factor ne arată ce parte a suprafeței din cea maxima posibilă, pentru  $I_{sc}$  și  $U_0$  dați, reprezintă puterea debitată de fotoelement.

**f) Rezistența internă** se determină din tangenta la curba  $I - U$  dusă în punctul  $M$  corespunzător puterii maxime:

$$R_{\text{int}} = \left. \frac{dU}{dI} \right|_M \quad (7)$$

**g) Rezistența serie** se determină din tangenta la curba  $I - U$  dusă în punctul  $U$ .

$$R_s = \left. \frac{dU}{dI} \right|_{\substack{U=U_0 \\ I=0}} \quad (8)$$

**h) Rezistența paralel** se determină din tangenta la curba  $I - U$  dusă în punctul  $I_{sc}$ .

$$R_p = \left. \frac{dU}{dI} \right|_{\substack{I=I_{sc} \\ U=0}} \quad (9)$$

**Principiul metodei** de determinare a acestor parametri constă în ridicarea caracteristicii  $I - U$ , prin măsurarea curentului debitat și a tensiunii la bornele celulei, pentru diferite valori ale rezistenței de sarcină conectată la bornele celulei, variată în principiu de la zero la infinit.

Trăsătura distinctivă a acestei caracteristici constă în faptul că ea traversează și în cadranul IV, unde produsul  $P = I, U$  este negativ. Prin aceasta se atestă că celula fotovoltaică constituie un generator față de elementele circuitului extern.

Din caracteristica statică corespunzătoare iluminării maxime admise se delimitează dreptunghiul puterii maxime (porțiunea hașurată din fig. 4), a cărui valoare este folosită în calculul randamentului celulei.

#### 2.4. Celule solare pe bază de Si

Siliciul reprezintă materialul semiconductor cel mai adecvat pentru conversia energiei solare în energie electrică, deoarece el prezintă o serie de proprietăți avantajoase în acest scop:

- valoarea mare a energiei benzii interzise  $E_g = 1,09 \text{ eV}$  ;
- abundența materiei prime în natură (nisipul) și producerea acestui semiconductor la scară industrială;
- tehnologia de producere bine pusă la punct, atât pentru obținerea siliciului pur, cât și pentru impurificarea sa controlată;
- stabilitatea în timp a fotoelementelor cu Si și randamentul mare de conversie a radiației solare, cu o fiabilitate ridicată, putând funcționa timp îndelungat fără supraveghere.

Utilizarea lor la nivelul solului implică o bună adaptare la spectrul A.M.I ( $100 \text{ mW/cm}^2$ ) adică alegerea adâncimii optime a joncțiunii și protejarea structurilor semiconductoare față de acțiunea mediului înconjurător printr-o încapsulare adecvată.

Celulele solare ce se fabrică în prezent au forma dreptunghiulară, pătrată, circulară sau semicirculară, alegerea geometriei fiind la latitudinea producătorului.

#### 3. Descrierea instalației experimentale

Schema instalației este arătată în fig. (6) și cuprinde:

- sursa de radiație S (bec de 200 W).
- celulă solara cu Si de fabricație românească (ICPE) montată într-un suport izolat cu patru terminale (A,a-B,b) care permit conectarea separată a circuitului de sarcină de circuitul voltmetrului.



- microampermetrul “ $\mu A$ ”, care are o rezistență mică, domenii de măsurare în gama 0,1 – 500  $\mu A$ , clasă de precizie minimum 0,5.

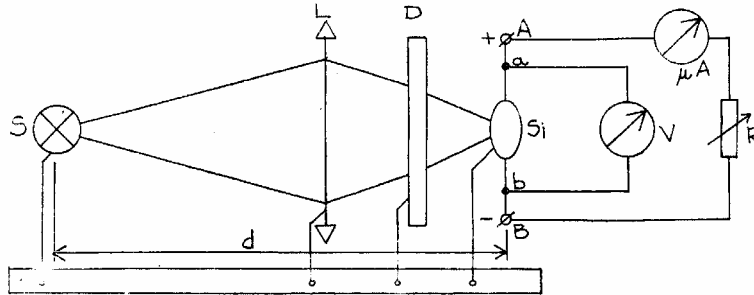


Fig. 6

- rezistența de sarcină “ $R_i$ ”, care trebuie să fie variabilă în gama 0,1-20.000 ohm și clasă 0,2 sau 0,1.
- voltmetrul “V” trebuie să aibă o rezistență proprie  $R_v$  peste 1000 ohm, domenii de măsurare în gama 0 - 600 mV și clasa de precizie minimum 0,5. În cazul în care voltmetrul consumă un curent mai mare decât  $I/1000$  ( $U$  și  $I$  fiind valorile măsurate de voltmetru, respectiv microampermetru), curentul de sarcină al celulei,  $I$  trebuie calculat cu formula:

$$I = I_v + I \quad (10)$$

- lentilele L.

#### 4. Modul de lucru

- 4.1. Se fixează celula solară în suportul său și se execută conexiunile electrice între terminalele A,B și a,b cu circuitul de sarcină respectiv cu circuitul voltmetrului.

Valoarea inițială a rezistenței de sarcină  $R$  se fixează la 10 000 ohm, iar domeniile de măsurare ale aparatelor se aleg corespunzător punctului de mers în gol  $I \cong 0$ .

- 4.2. Iluminarea celulei se obține fixând o distanță  $d = [30 - 50]$  mm între sursa și suprafața activă a celulei solare.
- 4.3. Se întrerupe circuitul de sarcină, determinându-se cel mai apropiat punct de  $U$ , deoarece în acest caz  $I = I_v \neq 0$ .
- 4.4. Se dau valori rezistenței  $R = 10\ 000$  (de ex. =5000; 2500; 1000; 500; 250; 100; 20; 10; 5, 2,1, 0,5, 0,2, 0 ohm).

Simultan se modifică domeniile de măsurare la voltmetru și microampermetru, în scopul măsurării cu erori cât mai mici de citire.

Valorile obținute se trec într-un tabel de date conform modelului alăturat.

	VOLTMETRU				MICRO-AMPERMETRU			VALORI CALCULATE		OBS
	div.	scara	$U$	$R_v$	div.	scara	$I'$	$I_v$	$I = I_v$	
$R$	div.	scara	$U$	$R_v$	div.	scara	$I'$	$I_v$	$I = I_v$	
$\Omega$	div.	V/div.	V	$\Omega$	div.	$\mu\text{A}/\text{div.}$	$\mu\text{A}$	$\mu\text{A}$	$\mu\text{A}$	-
$\infty$									$I = I_v$	
$10^4$										
.										
.										

$R_v$

Scara (mV)	15	30	150	500	1500	3000
$R_x$ (K $\Omega$ )	0,1	0,2	1	5	10	20

## 5. Prelucrarea datelor experimentale

- 5.1. Trasarea caracteristicii  $I - U$  se face prin puncte, corespunzătoare diferitelor valori ale rezistenței de sarcină  $R$ .

Pentru o valoare dată rezistenței de sarcină, se măsoară tensiunea  $U$  și se calculează curentul dat de celulă  $I$ , pe baza curentului de sarcină  $I$  măsurat și a rezistențelor  $R$ ,  $R_v$  existente în circuit în acel moment.

Se determină în același fel valorile curent-tensiune, pentru 12-15 valori ale rezistenței de sarcină cuprinse între  $\infty$  și 0, trasându-se apoi caracteristica  $I-U$  pe hârtie milimetrică;

5.2. Determinarea parametrilor celulei solare din caracteristica  $I-U$

- tensiunea în circuit deschis (gol)  $U_0$
- curentul de scurt-circuit  $I$
- puterea maximă debitată  $P_{\max}$
- factorul de umplere  $F$
- rezistența internă în condițiile debitării unei puteri maxime  $R_{\text{int}}$ .

### **Bibliografie**

- [1] I. M. Popescu, “Fizica și Ingineria laserilor”, Editura Tehnică, 2000.