

EFECTUL FOTOVOLTAIC

1. Scopul lucrării

În lucrare se studiază comportarea unei celule fotovoltaice la diferite valori ale iluminării și se determină eficiența de conversie a celulei.

2. Teoria lucrării

Efectul fotovoltaic constă în apariția unei tensiuni electromotoare într-un semiconductor dacă acesta este iluminat. Iluminarea semiconductorului determină numai generarea purtătorilor de sarcină de neechilibru (electroni și goluri) dar pentru a lua naștere o t.e.m. este necesară separarea acestora de către un *câmp intern imprimat*. Într-o joncțiune *p-n* acest câmp este chiar câmpul electric din stratul de baraj. Pot exista și alte mecanisme de generare a efectului fotovoltaic dar, în cele ce urmează, vom studia doar celula (generatorul) fotovoltaică realizată cu joncțiunea *p-n*.

În corpul solid, datorită interacțiunii dintre electronii și nucleele diferiților atomi, a cărei intensitate crește odată cu apropierea atomilor, în locul nivelelor energetice din atomii izolați, apar *benzile de energie*. Între benzile de energie *permise* se află benzi *interzise*. Banda de energie permisă, ocupată (parțial sau total) de către electronii de valență se numește *bandă de valență*, BV. Următoarea bandă de energie permisă este *banda de conducție*, BC. Cele două benzi sunt separate printr-o bandă interzisă de lățime, pe scara energetică, E_g . În materialele semiconductoare BV este complet ocupată iar BC este complet goală.

Lățimea benzii interzise, pentru materialele semiconductoare uzuale (germaniu, siliciu, AsGa etc), este $E_g \approx 1-2$ eV. Ca urmare, materialele semiconductoare se comportă la temperaturi joase ca niște izolatori, un câmp electric aplicat nu poate mișca electronii deoarece ei nu au în vecinătate stări energetice libere în care să poată trece pe seama energiei primite de la câmp. La temperaturi ridicate însă, chiar la temperatura camerei, un număr important de electroni pot trece, pe seama energiei termice, din BV în BC, devenind *liberi* să se miște prin cristal.

Când un electron este scos dintr-o legătură covalentă, în urma sa rămâne sarcină pozitivă necompensată, adică un *gol*. Un electron al unui atom vecin poate ocupa acest loc gol, lăsând un loc vacant la atomul vecin și așa mai departe. În semiconductorul *intrinsec* (pur) golurile din BV și electronii din BC sunt în număr egal (figure 1). Când se aplică un câmp electric, electronii și golurile se mișcă în sensuri opuse, golurile comportându-se ca particule cu sarcină pozitivă.

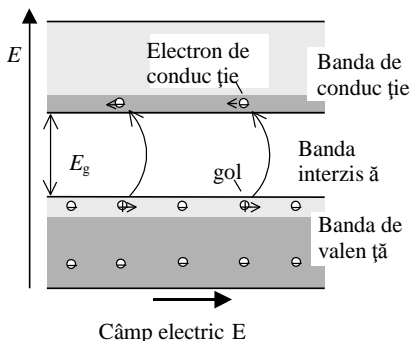


Fig 1. Schema tranzițiilor din BV în BC la semiconductorii intrinseci.

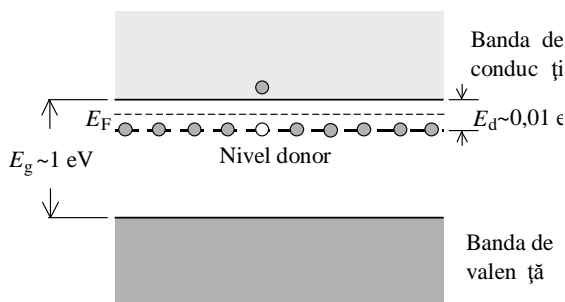


Fig. 2a Nivele energetice în semiconductor **n**.

de energie, energia celui de al cincilea electron corespunde unui *nivel energetic donor* plasat în banda interzisă, la “distanță” de cca 0,01 eV de banda de conducție (figure 2a). Impuritățile pentavalente se numesc *donoare*, conductivitatea electrică a semiconductorului astfel impurificat este asigurată, în principal, de mișcarea electronilor din BC, iar materialul se numește *semiconductor de tip n*.

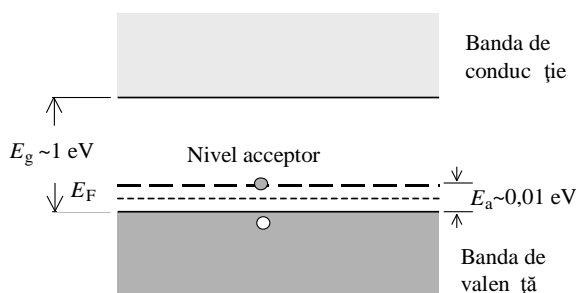


Fig. 2.b Nivele energetice în semiconductor **p**.

trivalent (*impuritatea acceptoare*) care a captat un electron devine *ion negativ*, cu poziție fixă în rețea. Electronul capturat de atomul de impuritate este reținut de acesta printr-o interacțiune care îi corespunde o energie reprezentată în imaginea benzilor printr-un nivel energetic, numit *nivel acceptor*, plasat deasupra benzii de valență, la “distanță” de cca 0,01 eV (figure 2b). În semiconductorul dopat cu impurități acceptoare conducția electrică este asigurată aproape în întregime de mișcarea golurilor, echivalente cu particule pozitive, iar materialul se numește *semiconductor de tip p*.

Joncțiunea p-n (dioda semiconductoră) este formată la zona de contact dintre o regiune cu impurități de tip *p* și alta cu impurități de tip *n*. Considerăm o joncțiune *p-n* cu regiunea *p* foarte subțire (figure 3) astfel încât fotonii de energie $h\nu$ să poată pătrunde în regiunea stratului de baraj.

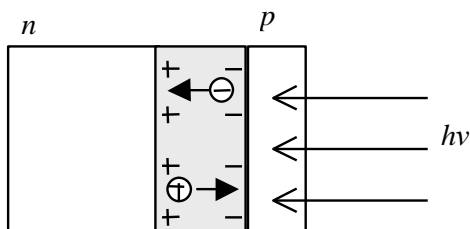


Fig. 3 Joncțiunea p-n.

urmare, se va naște prin joncțiune curentul I_j , orientat de la *p* la *n*, astfel încât curentul total prin dioda iluminată este

Conductibilitatea unui semiconductor poate fi schimbată semnificativ prin adăugarea de impurități, adică prin *dopare*. Astfel, prin adăugarea în semiconductorul cu atomi tetravalenți (Ge, Si) a unei mici cantități de atomi din grupa a V-a a sistemului periodic (P, As, Sb), cu cinci electroni de valență, patru dintre electronii de valență ai atomului impuritate participă la legăturile covalente cu atomii semiconductorului. Cel de al cincilea electron este slab legat (cca 0,01 eV) și se comportă practic ca electron liber să se miște în cristal, deoarece el poate trece, chiar la temperatura camerei, în BC. În imaginea benzilor

Doparea cu atomi ai elementelor din grupa a treia a sistemului periodic (B, Al, Ga, In, Tl), care au trei electroni pe stratul de valență, produce un efect asemănător. Un atom trivalent introdus ca impuritate în rețeaua semiconductorului tetravalent, are nevoie spre a participa la legătura covalentă cu atomii vecini, de un electron pe care-l “fură” de la un atom al semiconductorului, formând în vecinătatea acestuia un *gol*, care, la rândul lui, poate fi completat cu un electron de la alt atom și în felul acesta golul se deplasează în cristal ca o particulă cu sarcină pozitivă. Atomul

Dacă energia acestor fotoni este mai mare sau cel puțin egală cu lățimea energetică a benzii interzise, electronii din zona de valență pot trece în zona de conducție, formându-se în felul acesta perechea electron-gol. Câmpul electric din stratul de baraj va separa aceste sarcini, acționând ca un câmp intern imprimat, care antrenează electronii spre zona *n* iar golurile spre zona *p*, generând astfel un curent de iluminare $I_L = i_{nL} + i_{pL}$. Acumularea electronilor în zona *n* și a golurilor în zona *p* va genera o polarizare a diodei și, ca

$$I = I_L - I_j = I_L - I_s [\exp(eU / k_B T) - 1] \quad (1)$$

în care U este tensiunea la bornele diodei, I_s - curentul invers de saturație al diodei neiluminate, T - temperatura diodei, $e=1,6 \cdot 10^{-19}$ C - sarcina electrică elementară iar $k_B=1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K este constanta lui Boltzmann.

Caracteristica diodei iluminate, descrisă de (1), este reprezentată în fig.4, în care porțiunea din cadranul întâi corespunde funcționării diodei ca generator de tensiune fotoelectromotoare (celulă fotovoltaică).

Dacă celula este scurtcircuitată ($U=0$) rezultă

$$I_L = I_{sc} \quad (2)$$

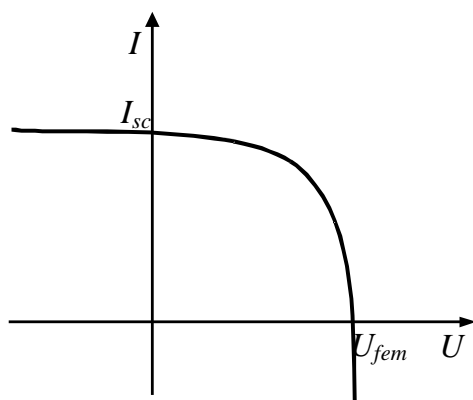


Fig. 4 Caracteristica curent-tensiune a celulei fotovoltaice.

iar dacă celula se află în gol ($I=0$), atunci la bornele ei se măsoară chiar tensiunea fotoelectromotoare

$$U = U_{fem} \quad (3)$$

Celulele fotovoltaice se utilizează, în principal, pentru conversia energiei solare în energie electrică. Puterea electrică dezvoltată de o celulă solară pe o rezistență de sarcină R se poate scrie, ținând seamă de (1):

$$P_{el} = UI = UI_L - UI_s [\exp(eU / kT) - 1] \quad (4)$$

care variază în funcție de tensiunea la borne, ea însăși funcție de R , $U=U(R)$. Maximul puterii electrice dezvoltate se obține din condiția:

$$\frac{dP_{el}}{dR} = \frac{dP_{el}}{dU} \frac{dU}{dR} = \frac{dP_{el}}{dU} I = 0 \quad (5)$$

adică:

$$\frac{dP_{el}}{dU} = I_L - I_s [\exp(eU / kT) - 1] - UI_s \frac{e}{kT} \exp(eU / kT) = 0 \quad (6)$$

Ținând seamă de (1), se obține o relație între valorile curentului și tensiunii, corespunzătoare maximului puterii electrice:

$$I_m = I_s U_m \frac{e}{kT} \exp(eU_m / kT) \quad (7)$$

și deci

$$R_m = \frac{U_m}{I_m} = \frac{kT}{eI_s} \exp(-eU_m / kT) \quad (8)$$

3. Dispozitivul experimental

Folosind montajul experimental din figura 5, celula fotovoltaică este iluminată cu ajutorul becului B, într-un aranjament experimental care permite variația iluminării modificând distanța de la sursa de lumină la celulă, glisand suportul celulei pe o tijă.

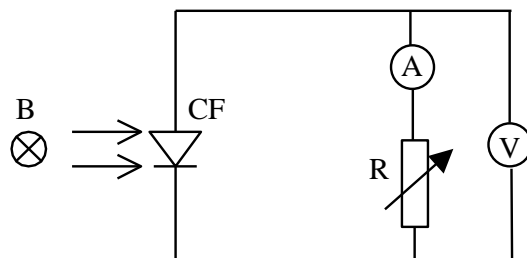


Fig. 5 Schema montajului experimental.

4. Modul de lucru

1. Se recomandă a se lucra la următoarele valori ale iluminării determinate cu ajutorul luxmetrului PU 150 : $E=53 \text{ Klx}$ ($D=93$, $I_{sc}=1 \text{ mA}$); $E=36 \text{ Klx}$ ($D=92$, $I_{sc}=0,7 \text{ mA}$); $E=14 \text{ Klx}$ ($D=85,5$, $I_{sc}=185 \text{ mA}$), unde D reprezintă poziția celulei față de originea riglei.
2. Se alege o anumită iluminare și o anumită poziție a celulei , apoi se modifică rezistența de sarcină R (între 200 și 2000Ω), notând valorile lui U și I în tabelul 1.

Tabel 1

$E=...$						
$R (\Omega)$	$U(V)$	$I(mA)$	$P_{el}(W)$	$P_{inc}(W)$	$P_{el,m}(W)$	$\eta (\%)$

$R_m=...$ $U_m=...$ $I_m=...$

3. Se procedează la fel pentru celelalte iluminări.
4. Se precizează I_{sc} și U_{fem} pentru fiecare iluminare.

5. Prelucrarea datelor experimentale

1. Cu datele măsurate anterior, se calculează $P_{el}=UI$ pentru fiecare valoare a rezistenței de sarcină și se reprezintă $P_{el}(R)$, pentru fiecare iluminare.

Se definește *randamentul (eficiența) de conversie* al celulei:

$$\eta = P_{el,m} / P_{inc} \quad (9)$$

în care $P_{el,m}$ este puterea electrică maximă dezvoltată pe rezistența de sarcină iar P_{inc} este puterea incidentă (a radiației luminoase) pe celulă.

2. Puterea incidentă se află din relația

$$P_{inc} = 0,013ES \quad (10)$$

și se obține în watt dacă iluminarea E se exprimă în lx iar suprafața iluminată S a celulei în m^2 ; pentru celula utilizată $S=13 \text{ mm}^2$.

3. Din graficul $P_{el}(R)$ se citește $P_{el,m}$ și apoi cu (9) se calculează randamentul celulei fotovoltaice, pentru iluminarea corespunzătoare.
4. Din graficul $P_{el}(R)$ se citește valoarea rezistenței de sarcină R_m care optimizează puterea electrică pe rezistența de sarcină.
5. Din tabelul de rezultate se citesc apoi valorile corespunzătoare pentru I_m și U_m care, introduse în (7) sau (8) permit calcularea curentului invers de saturație I_s .

6. Întrebări

1. Care sunt purtătorii de sarcină minoritari și majoritari în regiunea n a diodei?
2. Care este originea câmpului electric din stratul de baraj?
3. Ce este efectul fotovoltaic?
4. În ce condiție fotonii incidenți pot genera perechi electron-gol?
5. Care este cauza apariției tensiunii fotoelectromotoare în joncțiunea $p-n$?
6. Care este expresia intensității curentului prin fotocelulă? Precizați semnificația mărimilor fizice care intervin.
7. Cum pot fi măsurate tensiunea fotoelectromotoare și curentul de iluminare prin celulă?
8. Cum se poate modifica iluminarea fotocelulei?
9. Cum se definește randamentul de conversie al celulei fotovoltaice?
10. Cum poate fi calculată puterea electrică dezvoltată pe sarcină? Dar puterea incidentă pe celulă cum se determină?

7. Bibliografie:

1. N. Pop, A. Pacurar, *Fizică generală în aplicații practice*, Editura Politehnica (2016).
2. Luminosu I., *Fizică – teme experimentale* - Editura Politehnica (2009).
3. I. Damian, D. Popov, *Teme experimentale*, Editura Politehnica (2003).
4. C. Marcu, I. Mihalca, D. Mihailovici, I. Damian, R. Baea, M. Cristea, *Lucrari de laborator Fizică* (1981).