

Studiul efectului fotovoltaic

1 Considerații teoretice

Pentru început vom prezenta câteva considerații asupra joncțiunii $p - n$.

Considerăm un cristal semiconductor de formă paralelipipedică pe care îl impurificăm, după o anumită lege, dinspre o față cu impurități donoare și dinspre fața opusă cu impurități acceptoare. În cristal se formează două regiuni, una de tip n , cealaltă de tip p . Sau pot fi alipite două cristale semiconductoare impurificate diferit. În ambele situații purtătorii majoritari din cele două regiuni vor migra către regiunea unde sunt minoritari, astfel că în zona de contact a celor două regiuni se formează o zonă sărăcită de purtători liberi, zonă ce se numește *Regiune de Sarcină Spațială*, (*RSS*), și constituie elementul fundamental al joncțiunii $p - n$ (*Figura 1*).

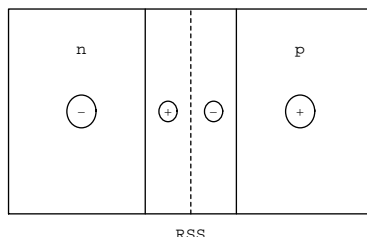


Figura 1.

În RSS ionii pozitivi din regiunea n , respectiv negativi din regiunea p , ce constituie sarcină legată, dau naștere unui câmp electric \vec{E} , orientat de la regiunea n înspre regiunea p , câmp ce se opune migrării electronilor dinspre regiunea n , unde sunt purtători majoritari, înspre regiunea p unde sunt purtători minoritari. Acest câmp va antrena purtătorii minoritari din cele două regiuni. Câmpului indus de sarcina legată îi corespunde o diferență de potențial $U_0 = \frac{E}{d}$, unde cu d am notat grosimea *RSS*. Acțiunea acestei diferențe de potențial este similară unei bariere de potențial. Numai purtătorii cu energia cinetică mai mare decât lucrul mecanic, eU_0 , efectuat de această diferență de potențial, U_0 , vor putea escalada bariera de potențial. În *Figura 2* prezentăm *RSS* cu câmpul electric ce ia naștere în ea, (*a*), concentrația golurilor, (*b*), concentrația electronilor, (*c*) și diferența de potențial U_0 , corespunzătoare câmpului electric indus de sarcina legată, (*d*).

Dacă aplicăm o diferență de potențial din afară, U_a , de polaritate opusă lui U_0 înălțimea barierei va scădea și ca urmare mai mulți purtători majoritari vor putea trece peste barieră. Spunem că joncțiunea $p - n$ a fost *polarizată direct*. Dacă polaritatea diferenței de potențial aplicată este identică cu cea a diferenței de potențial U_0 atunci înălțimea barierei va crește și ca urmare mai puțini purtători majoritari vor trece peste barieră (*Figura 3*). Spunem că joncțiunea $p - n$ a fost *polarizată invers*.

Vom considera acum un semiconductor omogen pe care cade un fascicul de lumină, a cărui intensitate scade după legea Beer-Bouguer-Lambert pe măsură ce pătrunde în semiconductor. Absorbția luminii va provoca generarea de purtători de sarcină. Viteza de generare a acestor purtători va scădea exponențial cu pătrunderea în material, iar faptul că are loc o generare neuniformă de purtători va provoca difuzia lor în profunzimea semiconductorului. Coeficienții de difuzie ai electronilor și ai golurilor sunt diferiți, fapt ce va produce o separare spațială a acestora. Electronii, cu mobilitate mai mare,

vor pătrunde mai mult în semiconductor decât golurile astfel că suprafața iluminată a semiconductorului se încarcă pozitiv, iar suprafața neiluminată se încarcă negativ, între cele două suprafețe stabilindu-se un câmp electric orientat după direcția iluminării, înspre interiorul materialului.

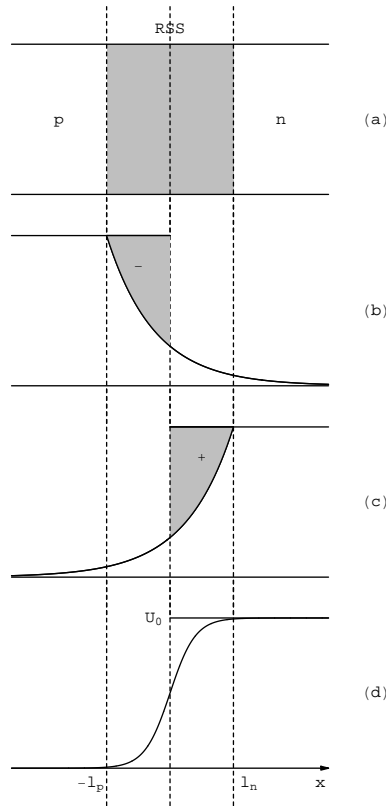


Figura 2.

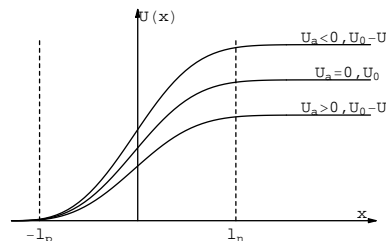


Figura 3.

Apariția unui câmp electric într-un semiconductor omogen, iluminat, se numește *efect Dember*. Nu vom prezenta aici teoria acestui efect, ci numai câteva aspecte calitative. Câmpul electric este determinat de diferența dintre fluxul de difuzie al electronilor, respectiv al golurilor, fluxuri determinate de intensitatea luminii.

Să analizăm acum generarea purtătorilor de sarcină într-o joncțiune $p-n$ în care există o *RSS* și un câmp electric, \vec{E}_i , orientat dinspre regiunea n înspre regiunea p , joncțiune pe care o iluminăm (*Figura 4.*).

Sub acțiunea luminii în joncțiune se vor genera *purtători de sarcină de neechilibru*, iar joncțiunea conectată într-un circuit va da naștere unui curent orientat dinspre regiunea p

înspre regiunea n provocând anularea concentrației în exces a electronilor și a golurilor. Acest fenomen stă la baza funcționării fotoelementelor $p - n$ și a convertizoarelor de energie luminoasă în energie electrică, așa numitele *baterii solare*, și poartă numele de *efect fotovoltaic*. Acest efect se observă în cazul iluminării oricăror contacte redresoare dintre un metal și un semiconductor și poate fi utilizat pentru studiul proprietăților acestora.

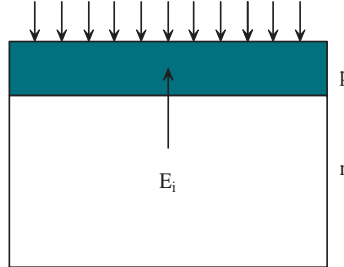


Figura 4

Expresia curentului, I , ce ia naștere în circuit este

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qU}{k_B T}} - 1 \right) \quad (1)$$

unde q este sarcina electronului, U diferența de potențial de polarizare a fotocelulei, k_B constanta lui Boltzmann, T temperatura la care se găsește celula fotovoltaică, respectiv I_0 curentul invers de saturație.

Celula fotovoltaică prezintă o rezistență serie, R_s , datorită rezistenței electrice a ariei de contact, rezistenței regiunii bazei și a stratului difuzat sau depus, cu valori de ordinul zecimilor de Ω până la câțiva Ω , precum și o rezistență paralelă, R_p , datorită punților metalice între capetele joncțiunii și ale altor defecte de margine pe unde se pot scurge purtători de sarcină șuntând joncțiunea, cu valori de la câteva mii de Ω la câteva zeci de mii de Ω . În *Figura 5* este prezentată schema echivalentă a unei astfel de celule fotovoltaice, până la linia verticală întreruptă.

Înmulțind ecuația (1) cu U obținem puterea electrică, P_{el} , dezvoltată în circuit, putere ce variază cu rezistența de sarcină. Punând condiția de maxim pentru P_{el} , ($dP_{el}/dU = 0$), obținem valorile curentului, I_m , și a tensiunii, U_m , pentru care puterea debitată în circuit, concret, pe rezistența de sarcină R , este maximă

$$I_m = I_0 \frac{qU_m}{k_B T} e^{\frac{qU_m}{k_B T}} \quad (2)$$

2 Prezentarea instalației experimentale

Se realizează un montaj conform cu schema electrică din *Figura 5*

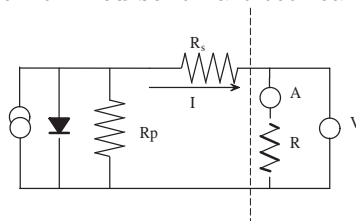


Figura 5

3 Modul de lucru

1. Scopul lucrării îl constituie determinarea rezistenței optime și a parametrilor electrici ai unei fotocelule utilizând instalația prezentată în *Figura 5*.

2. Se identifică părțile componente ale instalației.

3. Măsurătorile se fac pentru 3 poziții ale fotocelulei în raport cu sursa de lumină : reperele 92, 90, respectiv 88 de pe regla pe care se poate deplasa fotocelula. Modificând rezistența de sarcină, între valorile $20[\Omega]$ și $2920[\Omega]$ cu pasul $100[\Omega]$ se citesc valorile curentului și tensiunii completându-se coloanele 3 și 4 din Tabelul 2.

4. Pentru rezultatele de la reperul 92 se completează coloana a 5-a și se determină rezistența optimă. În continuare se măsoară în jurul acestei valori pentru câte 10 valori, mai mici, respectiv mai mari, ale rezistenței electrice, valori ce se modifică cu pasul $10[\Omega]$ și rezultatele se trec în Tabelul 3.

5. Se reia secvența 4 cu modificări ale rezistenței cu $1[\Omega]$ și se completează Tabelul 4.

Tabelul 1

Nr. crt.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
d [cm]	93	92,5	92	91	90	89	88	87	86	85,5	85	84	83	82	81
E [klx]	53	42,22	36	29	25	22	19,3	17	15	14	11,5	13,2	10	8,66	7,5

Tabelul 2

 $d = 92$ [cm]

1	2	3	4	5
Nr. crt.	R Ω	U [mV]	I [μ A]	P_{el} [μ W]
1	20			
2	120			
3	220			
4	320			
5	420			
6	520			
7	620			
8	720			
9	820			
10	920			
11	1020			
12	1120			
13	1220			
14	1320			
15	1420			
16	1520			
17	1620			
18	1720			
19	1820			
20	1920			
21	2020			
22	2120			
23	2220			
24	2320			
25	2420			
26	2520			
27	2620			
28	2720			
29	2820			
30	2920			

$$I_0 = \quad [\mu\text{A}]$$

Tabelul 3

 $d = 92$ [cm]

1	2	3	4	5
Nr. crt.	R [Ω]	U [mV]	I [μ A]	P_{el} [μ W]
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				
21				

Tabelul 4

 $d = 92$ [cm]

1	2	3	4	5
Nr. crt.	R [Ω]	U [mV]	I [μ A]	P_{el} [μ W]
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				
21				

Tabelul 2

 $d = 90$ [cm]

1	2	3	4	5
Nr. crt.	R Ω	U [mV]	I [μ A]	P_{el} [μ W]
1	20			
2	120			
3	220			
4	320			
5	420			
6	520			
7	620			
8	720			
9	820			
10	920			
11	1020			
12	1120			
13	1220			
14	1320			
15	1420			
16	1520			
17	1620			
18	1720			
19	1820			
20	1920			
21	2020			
22	2120			
23	2220			
24	2320			
25	2420			
26	2520			
27	2620			
28	2720			
29	2820			
30	2920			

$$I_0 = \quad [\mu\text{A}]$$

Tabelul 2
 $d = 88$ [cm]

1	2	3	4	5
Nr. crt.	R Ω	U [mV]	I [μ A]	P_{el} [μ W]
1	20			
2	120			
3	220			
4	320			
5	420			
6	520			
7	620			
8	720			
9	820			
10	920			
11	1020			
12	1120			
13	1220			
14	1320			
15	1420			
16	1520			
17	1620			
18	1720			
19	1820			
20	1920			
21	2020			
22	2120			
23	2220			
24	2320			
25	2420			
26	2520			
27	2620			
28	2720			
29	2820			
30	2920			

$$I_0 = \quad [\mu\text{A}]$$

4 Prezentarea rezultatelor

1. Se completează coloana cinci a tabelor cu date experimentale.
2. Se reprezintă grafic datele din coloana a cincea, P_{el} , în funcție de datele din coloana a doua, R , și se determină valoarea rezistenței R_{optim} pentru care puterea celulei este maximă, adică utilizarea acesteia se face în condiții optime.
3. Pentru fiecare pereche I_m, U_m se calculează curentul invers de saturație I_0 utilizând relația (2).
4. Se reprezintă grafic datele din coloana 4 în funcție de datele din coloana 3, ceea ce reprezintă caracteristica fotocelulei, $I(U)$.
5. Pe același grafic se reprezintă datele din coloana a 5 în funcție de datele din coloana 3, adică curba $P(U)$, făcându-se scalarea necesară/adecvată.
6. Utilizând curba $I(U)$ se determină pentru fiecare iluminare:
 - curentul de scurtcircuit I_{sc} și tensiunea în circuit dechis V_{0c} . Pentru valorile determinate se face calcul statistic.
 - rezistențele de șunt, R_{sh} , respectiv serie. R_s , ale fotocelulei ca inversul tangentei la grafic în punctele în care acesta taie axele de coordonate. Pentru valorile determinate se face calcul statistic.
 - Utilizând valorile I_{sc}, U_m din graficele $I(U)$ se calculează factorul de umplere, FF , cu relația

$$FF = \frac{I_m \cdot U_m}{I_{sc} \cdot U_{0c}} \quad (3)$$