

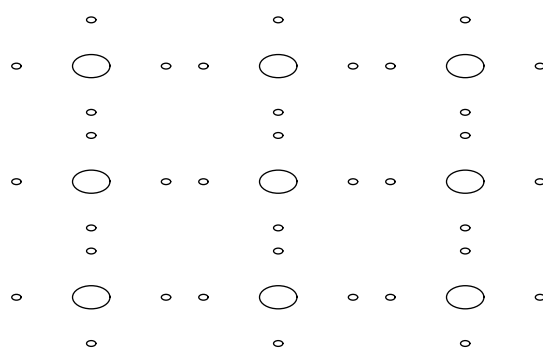
# Studiul dependenței de temperatură a rezistenței electrice a unui semiconductor

## 1 Considerații teoretice

Modul de variație cu temperatura a conductibilității electrice a materialelor este determinată de natura acestora. În funcție de valoarea conductivității electrice  $\sigma$ , a acestora, deosebim :

- *conductorii* cu  $\sigma = 10^7 \div 10^6 [S \cdot m^{-1}]$ ,
- *semiconductorii* cu  $\sigma = 10^6 \div 10^{-8} [S \cdot m^{-1}]$ ,
- *izolatorii* cu  $\sigma = 10^{-8} \div 10^{-16} [S \cdot m^{-1}]$ .

În această lucrare ne vom ocupa de stabilirea modului în care variază rezistența, și implicit, conductivitatea electrică a semiconductorilor cu temperatura. Semiconductorii, cu excepția celor amorfii, au structură cristalină, caracterizată prin așezarea tridimensională periodică a atomilor. Semiconductorii sunt elemente chimice din grupa a IV-a a tabelului lui Mendeleev și se realizează prin legături *covalente* sau *homopolare*. În *Figura 1* este prezentat un model de structură cristalină obținută prin legătură covalentă (cercurile mari reprezintă nodurile/ionii rețelei, iar cercurile mici reprezintă electronii de valență puși în comun).



*Figura 1.*

Proprietățile electrice ale semiconductorilor pot fi explicate cu ajutorul modelului benzilor de energie. Semiconductorii au pe ultima bandă energetică, banda de valență (*BV*), patru nivele ocupate și patru nivele libere. Fiecare atom din materialul semiconductor pune în comun cu patru atomi vecini câte un electron și își completează *BV*. Într-un semiconductor perfect, la temperaturi apropiate de 0[K], nu există electroni liberi, iar acesta se prezintă ca un izolator perfect. În semiconductor benzile energetice de valență, *BV*, și de conducție, *BC*, sunt separate de banda energetică interzisă, *BI*, cu valoarea  $\varepsilon_g$  în jurul a 1 eV. Dacă transferăm semiconductorului energie,  $\varepsilon > \varepsilon_g$ , prin încălzire sau prin iradiere, electronii părăsesc *BV* ajungând în *BC*. Numărul acestora crește cu temperatura după legea

$$n = C e^{-\frac{\varepsilon_g}{k_B T}} \quad (1)$$

unde  $\varepsilon_g$  reprezintă valoarea minimă a energiei necesară desprinderii electronului din  $BV$  a atomului,  $k_B$  constanta lui Boltzmann, iar  $T$  temperatura semiconductorului. Furnizând energie semiconductorului tot mai mulți electroni din  $BV$  o pot părăsi și ajung în  $BC$ .

În  $BV$  au rămas legături nesatisfăcute pentru care s-a acceptat denumirea de *goluri*.

Aplicând un câmp electric de intensitate  $\vec{E}$  electronii din  $BC$  vor fi antrenați în sens contrar câmpului dând naștere unui curent de densitate  $\vec{j}_n$  dat de relația

$$\vec{j}_n = e_n \mu_n n \vec{E} \quad (2)$$

unde cu  $e_n$  am notat sarcina electrică a electronului, cu  $\mu_n$  mobilitatea acestuia, iar cu  $n$  concentrația electronilor. În  $BV$  electronii din legături, sub acțiunea câmpului electric  $\vec{E}$ , vor ocupa golurile rezultate ca urmare a trecerii electronilor din  $BV$  în  $BC$ . Curentul electronilor de valență este în sens contrar câmpului și poate fi interpretat ca un *curent de goluri în sensul câmpului*.

Densitatea acestui curent de goluri este dată de relația

$$\vec{j}_p = e_p \mu_p p \vec{E} \quad (3)$$

unde cu  $e_p$  am notat sarcina electrică a golului, cu  $\mu_p$  mobilitatea acestuia, iar cu  $p$  concentrația golurilor. Putem spune că în semiconductor se stabilește un curent de densitate totală

$$\vec{j} = \vec{j}_n + \vec{j}_p = (e_n \mu_n n + e_p \mu_p p) \vec{E} = (\sigma_n + \sigma_p) \vec{E} = \sigma \vec{E} \quad (4)$$

unde cu  $\sigma$  am notat conductivitatea electrică a semiconductorului.

Din compararea relațiilor (1) și (4) obținem pentru dependența de temperatură a conductivității electrice a semiconductorului relația

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\varepsilon_g}{k_B T}} \quad (5)$$

Până acum am discutat despre *semiconductorul intrinsec*, semiconductor în care purtătorii de sarcină, electroni și goluri, apar prin ruperea legăturilor și trecerea electronilor din  $BV$  în  $BC$ . Conductibilitatea unui astfel de semiconductor se numește *conductibilitate intrinsecă*. Dar un semiconductor pur/intrinsec are puține utilizări. Pentru a diversifica câmpul de aplicații al semiconductorilor aceștia sunt impurificați cu elemente din grupa a III-a, respectiv a V-a. În primul caz în rețeaua cristalină locul unor atomi de semiconductor este luat de atomii elementului impurificator din grupa a treia. Fiecare dintre aceștia își pune cei trei electroni din  $BV$  în comun cu trei atomi de semiconductor, al patrulea atom de semiconductor din vecinătatea lui având o legătură nesatisfăcută, adică în cuprinsul semiconductorului impurificat apar goluri. Se spune că semiconductorul este impurificat cu *impurități acceptoare*, adică avem un *semiconductor de tip p*. În al doilea caz în rețeaua cristalină locul unor atomi de semiconductor este luat de atomii elementului impurificator din grupa a cincea. Fiecare dintre aceștia își pune patru electroni în comun cu patru atomi de semiconductor, dar îi rămâne un electron nelegat/liber. Se spune că semiconductorul este impurificat cu *impurități donoare*, adică avem un *semiconductor de tip n*. Conductibilitatea unui astfel de semiconductor impurificat cu elemente din grupa a III-a, respectiv a V-a, se numește *conductibilitate extrinsecă*. În *Figura 2* este prezentată dependența de temperatura a conductivității electrice a unui semiconductor pur, curba punctată, și a unui semiconductor impurificat, curba plină.

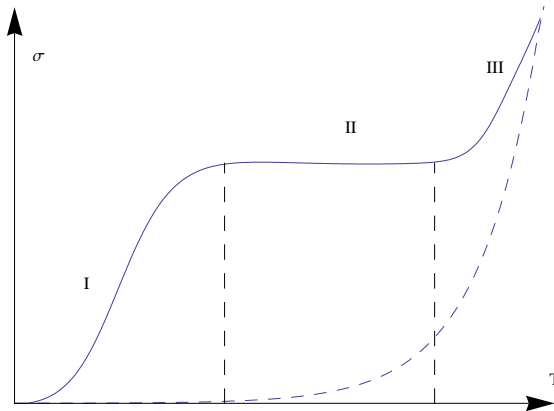


Figura 2

Pe curba plină observăm trei regiuni. Purtătorii din regiunea I sunt datorati impuritatilor ce se ionizeaza cu cresterea temperaturii. Regiunea II corespunde situatiei in care toate impuritatile sunt ionizate. Purtătorii din regiunea III sunt purtatori intrinseci. Prezența unor concentrații neuniforme de purtători mobili conduce la apariția unor fenomene de difuzie. Chiar dacă semiconductorul impurificat în cuprinsul căruia sunt concentrații neuniforme de purtători nu este plasat într-un câmp electric, în cuprinsul lui apar cureni electrici datorati gradientilor acestor concentrații, cureni orientati în sensul descreșterii acestor gradienti.

Între conductivitatea electrică  $\sigma$  și rezistivitatea electrică  $\rho$  ale unui material este relația

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (6)$$

și conform cu aceasta pentru dependența de temperatură a rezistenței electrice,  $R(T)$ , a unui fir de lungime  $l$  și secțiune  $S$  din acest material obținem

$$R(T) = \rho(T) \frac{l}{S} = R_0 e^{\frac{\varepsilon_g}{k_B T}} \quad (7)$$

unde cu  $R_0$  am notat rezistența electrică la temperatura mediului. În Figura 3 este prezentată dependența de temperatură a rezistenței electrice a unui metal (a), ( $R(T) = R_0(1 + \alpha \Delta T)$ ), respectiv a unui semiconductor (b) (relația (7)).

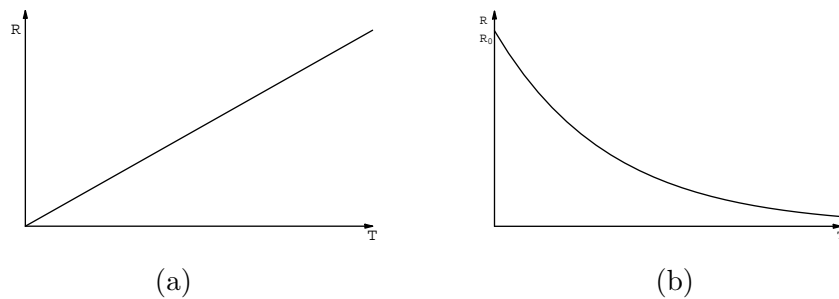


Figura 3.

Pentru un semiconductor se definește coeficientul de temperatură,  $\alpha_T$ , prin relația

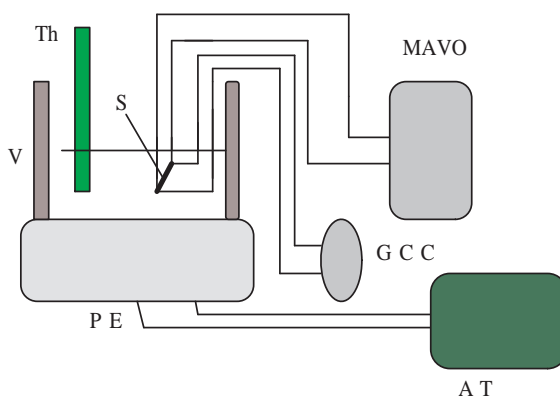
$$\alpha_T = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = -\frac{\varepsilon_g}{k_B T^2} \quad (8)$$

## 2 Prezentarea instalației experimentale

Instalația experimentală ce permite studiul dependenței de temperatură a rezistenței electrice a unui semiconductor este compusă din două părți (*Figura 4*):

- o parte ce permite *încălzirea* probei semiconductoare, formată dintr-o plită electrică (PE) ce are un radiator de 250 [W] și altul de 500 [W], un vas (V) ce conține alumină, vas în care se introduce proba semiconductoare (S) împreună cu termometrul (Th).

- o parte ce permite *măsurarea* temperaturii și a tensiunii pe proba semiconductoare, formată dintr-un termometru (Th) ce măsoară până la  $155^\circ\text{C}$ , un generator de curent constant (GCC), proba semiconductoare (S) și un multimetru MAVO-35 (MAVO).



*Figura 4*

## 3 Modul de lucru

1. Se identifică părțile componente ale instalației.
2. Se introduce în vasul cu alumină proba semiconductoare și termometrul având grijă ca proba semiconductoare și rezervorul termometrului să fie introduse complet în alumină.
3. Se alimentează plita electrică cuplându-se ambele radiatoare și se urmărește creșterea temperaturii în vas. Când temperatura ajunge la  $40^\circ\text{C}$  se decuplează radiatorul de 500 [W], iar când se ajunge la  $85^\circ\text{C}$  se decuplează radiatorul de 250 [W]. Temperatura în vas continuă să crească până peste  $155^\circ\text{C}$ .

**ATENȚIE LA TEMPERATURA DE  $160^\circ\text{C}$**  - depășirea ei determină oprirea (se poate sparge termometrul) și reluarea experimentului.

4. Prin proba semiconductoare se injectează de la generatorul de curent constant un curent de  $1,2mA$  și pe MAVO-35 se citește tensiunea culeasă de pe proba semiconductoare. Aplicând legea lui Ohm pentru o porțiune de circuit

$$R = \frac{U}{I} = \frac{U}{1,2 \cdot 10^{-3}} = \frac{10^3}{1,2} U = \frac{U[mV]}{1,2} \quad (9)$$

obținem că tensiunea exprimată în milivolți împărțită cu 1,2 este numeric egală cu rezistența exprimată în  $[\Omega]$ .

5. În decursul răcirii se notează temperatura începând cu  $155^\circ C$ , din grad în grad, până la  $40^\circ C$  și valoarea tensiunii electrice corespunzătoare, exprimată în  $[mV]$ . Cu toate că se cunoaște modul în care depinde rezistența unui semiconductor de temperatură noi propunem această metodologie de măsură, vor fi 116 puncte, pentru că un experiment reușit este cel în care se obțin cât mai multe date experimentale.

## 4 Prezentarea rezultatelor

1. Scopul acestei lucrări îl reprezintă stabilirea naturii semiconductorului prin determinarea lărgimii benzii interzise.
2. Rezultatele măsurătorilor se trec în Tabelul 1 de mai jos, coloana cinci.
3. După efectuarea măsurătorilor se completează coloanele patru, șase și șapte din Tabelul 1.
4. Din ecuația (7) obținem că

$$\ln R = \ln R_0 + \frac{\varepsilon_g}{k_B T}. \quad (10)$$

Se reprezintă grafic  $\ln R$  în funcție de  $1000/T$  pe hârtie milimetrică sau utilizând un program de fitare. Punctele de pe grafic se înscriu pe o dreaptă. Se determină panta dreptei, fie din considerente de geometrie analitică, fie utilizând un program de fitare. Odată panta dreptei determinată se obține lățimea benzii interzise, energia exprimându-se în  $[eV]$  și comparând cu datele din literatură se stabilește semiconductorul din care este realizată proba.

Este recomandabil să se transforme datele astfel încât lărgimea benzii interzise să se obțină din panta dreptei direct în  $[eV]$ .

Dacă prelucrarea datelor se face cu un program de fitare recomandăm ca datele să fie fitate și cu o ecuație de tipul (7) și să se compare rezultatele obținute prin cele două prelucrări.

5. Dacă se utilizează un program de fitare ce permite diferențierea funcției ce aproximează datele experimentale ce exprimă dependența rezistenței electrice a semiconductorului funcție de temperatură se obține dependența de temperatură a coeficientului de temperatură,  $\alpha_T$ .

Tabelul 1

1	2	3	4	5	6	7
Nr.crt	$t[^{\circ}C]$	T[K]	$1000/T[1/K]$	U[mV]	R[ $\Omega$ ]	ln R
1	155	428				
2	154	427				
3	153	426				
4	152	425				
5	151	424				
6	150	423				
7	149	422				
8	148	421				
9	147	420				
10	146	419				
11	145	418				
12	144	417				
13	143	416				
14	142	415				
15	141	414				
16	140	413				
17	139	412				
18	138	411				
19	137	410				
20	136	409				
21	135	408				
22	134	407				
23	133	406				
24	132	405				
25	131	404				
26	130	403				
27	129	402				
28	128	401				
29	127	400				
30	126	399				
31	125	398				
32	124	397				
33	123	396				
34	122	395				
35	121	394				
36	120	393				
37	119	392				
38	118	391				

1	2	3	4	5	6	7
Nr.crt	$t[^{\circ}C]$	T[K]	$1000/T[1/K]$	U[mV]	R[ $\Omega$ ]	ln R
39	117	390				
40	116	389				
41	115	388				
42	114	387				
43	113	386				
44	112	385				
45	111	384				
46	110	383				
47	109	382				
48	108	381				
49	107	380				
50	106	379				
51	105	378				
52	104	377				
53	103	376				
54	102	375				
55	101	374				
56	100	373				
57	99	372				
58	98	371				
59	97	370				
60	96	369				
61	95	368				
62	94	367				
63	93	366				
64	92	365				
65	91	364				
66	90	363				
67	89	362				
68	88	361				
69	87	360				
70	86	359				
71	85	358				
72	84	357				
73	83	356				
74	82	355				
75	81	354				
76	80	353				
77	79	352				
78	78	351				

1	2	3	4	5	6	7
Nr.crt	$t[^{\circ}C]$	T[K]	$1000/T[1/K]$	U[mV]	R[ $\Omega$ ]	ln R
79	77	350				
80	76	349				
81	75	348				
82	74	347				
83	73	346				
84	72	345				
85	71	344				
86	70	343				
87	69	342				
88	68	341				
89	67	340				
90	66	339				
91	65	338				
92	64	337				
93	63	336				
94	62	335				
95	61	334				
96	60	333				
97	59	332				
98	58	331				
99	57	330				
100	56	329				
101	55	328				
102	54	327				
103	53	326				
104	52	325				
105	51	324				
106	50	323				
107	49	322				
108	48	321				
109	47	320				
110	46	319				
111	45	318				
112	44	317				
113	43	316				
114	42	315				
115	41	314				
116	40	313				