

**UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" DIN BUCUREȘTI  
DEPARTAMENTUL DE FIZICĂ**

**LABORATORUL DE FIZICA SOLIDULUI  
BN - 120 A**

**POTENȚIALUL DE CONTACT  
METAL - SEMICONDUCTOR**

**2004 - 2005**

# POTENȚIALUL DE CONTACT METAL - SEMICONDUCTOR

## 1. Scopul lucrării.

Scopul lucrării constă în determinarea diferenței de potențial ce apare la contactul dintre un metal (M) și un semiconductor (S). Această diferență de potențial este cunoscută sub numele de *potențial de contact* sau *potențial de difuzie*.

## 2. Teoria lucrării

### 2.1. Considerații generale asupra fenomenului.

Când două substanțe sunt puse în contact, între ele apare un schimb de purtători de sarcină electrică, ceea ce determină o modificare a proprietăților atât la suprafața de contact cât și în profunzime. Dispozitivele electronice cu semiconductori se bazează pe această modificare a proprietăților fizice în zona suprafeței de contact.

Pentru înțelegerea fenomenelor determinate de existența contactului, este necesar să se studieze:

- variația proprietăților semiconductorului la introducerea lui într-un câmp electric;
- apariția diferenței de potențial la contactul metal – metal (M-M);
- apariția diferenței de potențial la contactul metal – semiconductor (M-S).

Rezultatele acestei analize pot fi sistematizate astfel:

a) În cazul introducerii unui semiconductor într-un câmp electric omogen exterior, câmpul electric se anulează - la o distanță oarecare de suprafața semiconductorului - ca rezultat al deplasării în volumul semiconductorului a purtătorilor de sarcină liberi (sub acțiunea câmpului exterior). Câmpul electric exterior pătrunde numai într-un strat superficial în care există sarcină spațială, în rest el fiind complet ecranat;

b) În regiunea sarcinii spațiale, zonele de energie se curbează. Dacă ele se curbează în sus, atunci stratul superficial se îmbogațește cu *goluri*, iar în cazul unei curbări în jos, se produce îmbogațirea cu *electroni*. Într-un *semiconductor intrinsec*, conducția straturilor de la suprafață crește independent de sensul câmpului. Într-un *semiconductor dopat* (semiconductor cu impurități), conducția stratului superficial se mărește atunci când câmpul exterior extrage din volum purtătorii de sarcină majoritari, și se micșorează dacă stratul superficial se îmbogațește cu *purtători de sarcină minoritari*. Variația conducției stratului superficial se numește *efect de câmp*;

c) Grosimea stratului în care există sarcină de volum și câmp electric și în care zonele de energie au o curbare considerabilă se caracterizează printr-o mărime  $L^D$  numită *lungimea de ecranare Debye* ce este dată de expresia:

$$L^D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon_r k_B T}{2e^2 n_i}} \quad ; \quad L^D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon_r k_B T}{e^2 n_0}} \quad (1)$$

unde  $e = 1.6 \times 10^{-19} C$  este sarcina electronului. În semiconductorul intrinsec avem  $n_0 = p_0 = n_i$ , unde  $n_0, p_0, n_i$  reprezintă corespunzător concentrațiile volumice a electronilor respectiv a golurilor iar  $n_i$  este concentrația intrinsecă). În semiconductorul impurificat, de exemplu de tip n, relațiile iau forma  $n_0 = N_d$ ;  $p_0 = n_i^2 / N_d$ , unde  $N_d$  reprezintă concentrația volumică a nivelelor donoare.

d) Pentru o intensitate suficient de mare a câmpului, în stratul superficial se poate modifica tipul conducției. Domeniul în care se produce modificarea tipului de conducție se numește *joncțiune fizică p-n*;

e) Într-un metal, concentrația electronilor liberi este mare, de aceea lungimea de ecranare Debye este considerabil mai mică decât distanța dintre atomi;

f) În cazul contactului dintre metale, între două puncte oarecare externe aflate pe metale diferite există o diferență de potențial numită **diferență de potențial de contact externă**. Din egalitatea fluxurilor electronilor ce trec prin contact dintr-un metal în altul rezultă că pe contact există o diferență de potențial, numită **diferență de potențial de contact internă**;

g) În cazul în care unul dintre metale este înlocuit cu un semiconductor datorită faptului că în volumul metalului nu poate exista un câmp electric în absența unui curent, întreaga diferență de potențial de contact cade pe stratul adiacent suprafeței semiconductoare, determinând curbarea zonelor de energie și apariția unei sarcini de volum;

h) La realizarea contactului a două corpuri, electronii trec din corpul cu **energia Fermi** mai mare în corpul cu energia Fermi mai mică. Fluxul orientat dispare în momentul în care nivelurile Fermi se egalizează.

În lucrarea de față se analizează și se determină potențialul de contact ce apare când cele două substanțe puse în contact sunt un metal și un semiconductor (contact M-S).

Acest fenomen poate fi bine explicat pe baza teoriei cuantice a "**efectului tunel**".

Analizând comparativ cazul unei particule de energie  $E$ , ce întâlnește bariera de potențial din fig.1 (cazul unidimensional) se constată:

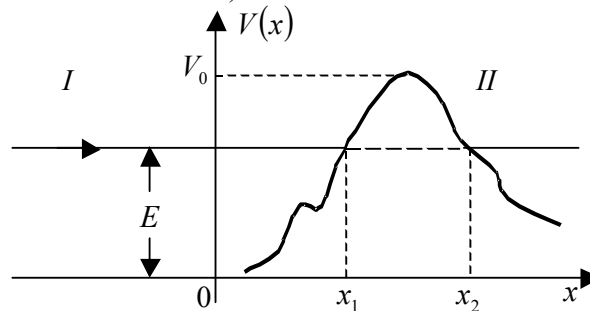


Fig. 1. Barieră de potențial de formă oarecare.

Din punctul de vedere al mecanicii clasice, particula se poate afla în dreapta barierei (zona II) doar dacă  $E > V_0$  (unde  $V_0$  este înălțimea barierei), altminteri ea rămâne localizată în zona I.

Din punctul de vedere al mecanicii cuantice o astfel de particulă poate traversa bariera cu o anumită probabilitate (diferită de zero), chiar dacă energia sa  $E < V_0$ . Un astfel de efect este cunoscut sub numele de "**efect tunel**".

Calculul arată că transparența unei bariere de potențial de formă oarecare  $V = V(x)$  este dată de formula:

$$T = T_0 \exp \left[ -\frac{2}{\hbar} \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{2m[V(x) - E]} dx \right] \quad (2)$$

unde  $m$ ,  $E$  reprezintă masa, respectiv energia particulei.

Pentru a înțelege cum apare această barieră de energie să analizăm fig.2 unde sunt reprezentate nivelurile energetice ale interfețelor **metal - vacuum**, **semiconductor - vacuum** și **metal - semiconductor** și totodată să definim câteva mărimi caracteristice.

**Nivelul de vid** reprezintă nivelul energetic al unui electron liber în vid, cu energie cinetică zero.

**Afinitatea electronică**  $\chi_S$  reprezintă energia necesară unui electron pentru a trece de la limita inferioară a benzii de conducție pe nivelul de vid ( $\chi_{Ge} = 4.13$  eV,  $\chi_{GaAs} = 4.08$  eV,  $\chi_{Si} = 4.01$  eV).

**Lucrul de extracție**  $\phi$  (sau lucrul de ieșire termodinamic) reprezintă diferența energetică dintre nivelul de vid și **nivelul Fermi** ( $E_F$ ). Pentru majoritatea metalelor și semiconductorilor lucrul de extracție este cuprins între 2 - 5 eV.

Pentru exemplul dat în fig. 2 a) lucrul de extracție  $\phi_M$  al metalului este mai mare decât lucrul de extracție  $\phi_S$  al semiconductorului ( $\phi_M > \phi_S$ ). La aducerea în contact a celor două corpuri, în primul moment se realizează o stare de neechilibru. În procesul schimbului de electroni, trecerea preferențială a electronilor se va face dinspre substanța cu energia Fermi mai mare înspre substanța cu energia Fermi mai mică. Astfel electronii din **banda de conducție** a semiconductorului vor trece în metal până când pozițiile nivelelor Fermi coincid (fig. 2b).

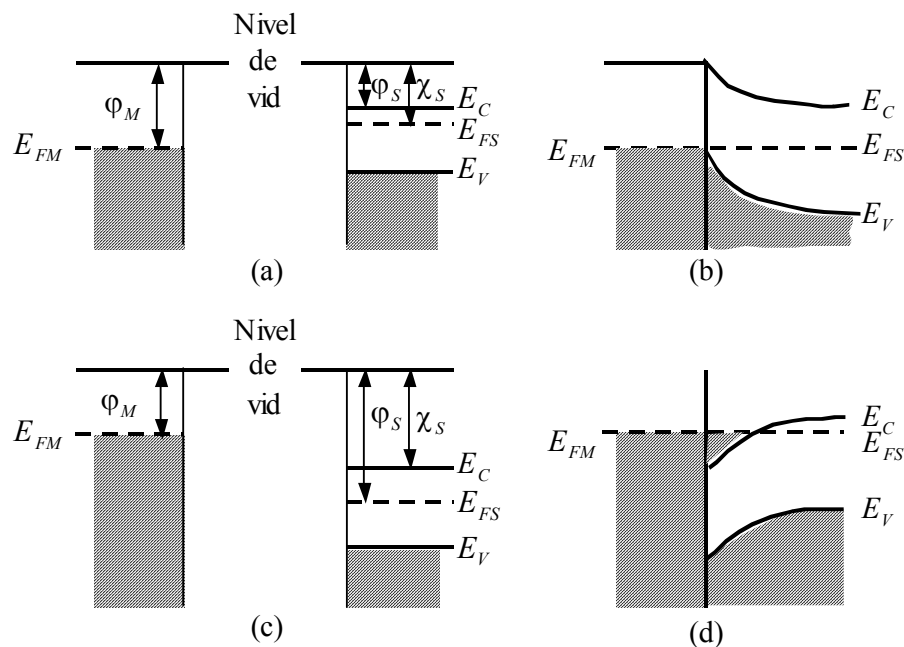


Fig. 2. Diagrama nivelurilor energetice la contactul M - S (S – tip n)  
a, b) - cazul  $\phi_M > \phi_S$ . Contactul are proprietatea de redresare (apare bariera);  
c, d) - cazul  $\phi_M < \phi_S$ . Contactul este ohmic deoarece în banda de conducție nu există barieră de potențial pentru electroni.

Având în vedere că lucrul de extracție al metalului este mai mare decât al semiconductorului ( $\phi_M > \phi_S$ ), din semiconductor înspre metal vor trece mai mulți electroni decât invers. Între metal și semiconductor apare o diferență de potențial:

$$U_D = \frac{\phi_M - \phi_S}{e} \quad (3)$$

Această diferență de potențial poartă denumirea de **potențial de contact** sau **potențial de difuzie**.

Datorită formării barierei energetice, contactul metal - semiconductor cu  $\varphi_M > \varphi_S$  are proprietăți de redresare și este ohmic în cazul semiconductorului de tip  $n$  când  $\varphi_M < \varphi_S$  (fig 2d).

Potențialul de contact se poate determina din dependența de temperatură a curentului de saturație  $I_S$  sau a rezistenței diferențiale  $R_d$  (care conține pe  $I_S$ ) (vezi Anexa I).

Ținând cont de calculele din Anexa I, rezistența diferențială este (A7):

$$R_d = \left( \frac{dI}{dU} \right)^{-1} = \frac{k_B T}{e I_S} \exp\left(-\frac{eU}{k_B T}\right) = \frac{4k_B T}{en_0 \bar{v}} \exp\left(-\frac{e(U_D - U)}{k_B T}\right) \quad (4)$$

unde  $\bar{v} = \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m}} \approx (k_B T)^{1/2}$ . Astfel:

$$\frac{R_d}{(k_B T)^{1/2}} = \text{const} \cdot \exp\left[\frac{e(U_D - U)}{k_B T}\right] \quad (5)$$

de unde rezultă prin logaritmare:

$$\ln\left[\frac{R_d}{(k_B T)^{1/2}}\right] = ct + \frac{e(U_D - U)}{k_B T} \cdot \frac{1}{T} \quad (6)$$

Dacă se măsoară  $R_d$  în funcție de temperatură pentru o tensiune de polarizare  $U = U_0$  și se construiește graficul  $\ln\left[\frac{R_d}{(k_B T)^{1/2}}\right] = f\left(\frac{1}{T}\right)$ , se obține o dreaptă din panta căreia se poate determina potențialul de contact:

$$U_D = U_0 + \frac{k_B}{e} \cdot \frac{\Delta\left(\ln\left[\frac{R_d}{(k_B T)^{1/2}}\right]\right)}{\Delta\left(\frac{1}{T}\right)} \quad (7)$$

### 3. Descrierea instalației experimentale și a aparaturii utilizate.

Montajul experimental (v. fig. 3) conține o diodă cu Germaniu (EFD - 314) având contact din wolfram, o sursă de tensiune stabilizată  $S$ , un voltmetru electronic  $V.E.$  cu afișaj numeric (E 303, DIGITAL VOLTMETER), un microampermetru  $\mu A$ , un cuptoraș  $C$  a cărui încălzire poate fi controlată cu ajutorul unui reostat și un termometru industrial  $T$ .

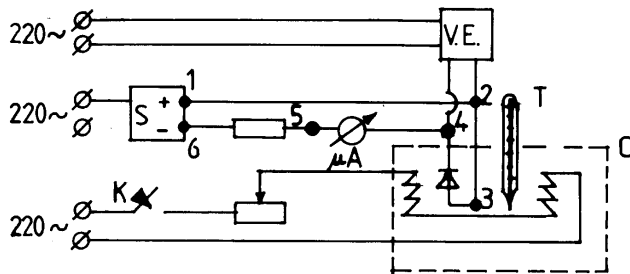


Fig. 3. Schema dispozitivului experimental

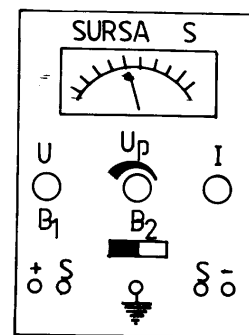


Fig. 4. Sursă de tensiune stabilizată

#### 4. Modul de lucru

- Se identifică elementele componente ale montajului. Se va avea grijă ca voltmetrul  $V.E.$ , cuptorașul  $C$  și sursa  $S$  să fie pe poziția “oprit” (pentru sursa  $S$  butonul  $B_2$  din fig. 4, să fie rotit la maximum spre stânga). Apoi se conectează aparatele la priza de 220V c.a;
- Se pornește sursa stabilizată  $S$ , rotind foarte puțin spre dreapta potențiometrul  $B_2$  (Rotirea va fi oprită de îndată ce se aude clicul);
- Se pornește voltmetrul electronic;
- Se polarizează direct dioda cu tensiunea  $U_0$  mică ( $U_0 = 0.02 - 0.04 V$ ), rotind potențiometrul  $B_1$  al sursei. Tensiunea se citește la  $V.E.$  (pus pe scara de 20V);
- Se pornește cuptorașul  $C$ ;
- Se menține constantă (pe cât e posibil) tensiunea  $U_0$  pe diodă acționând potențiometrul  $B_1$ .

#### 5. Indicații pentru prelucrarea rezultatelor experimentale.

Se vor citi simultan valorile mărimilor  $t(^{\circ}C)$ ,  $U_0(V)$  și  $I(\mu A)$  pentru valori ale lui  $t$  de la temperatura camerei până la  $65^{\circ} - 70^{\circ}$  din 5 în  $5^{\circ}C$ . Când temperatura a ajuns la  $65^{\circ} - 70^{\circ}C$ , se oprește alimentarea cuptorașului și se citesc  $t$ ,  $U_0$  și  $I$  la răcire, tot din 5 în  $5^{\circ}C$ .

Datele se trec în tabelul următor:

$t(^{\circ}C)$	$U_0(V)$	$I(\mu A)$	$R_d(\Omega)$	$T(K)$	$\frac{1}{T}(K^{-1})$	$\ln(R_d/(k_B T)^{1/2})$

Se calculează  $R_d = \frac{U_0}{I}$  pentru fiecare citire. Se completează restul coloanelor tabelului.

Se trasează graficul  $\ln[R_d/(k_B T)^{1/2}] = f\left(\frac{1}{T}\right)$ , pentru încălzire și răcire. Din pantele dreptelor se determină  $U_{Di}$  și  $U_{Dr}$  cu ajutorul formulei (7).

Se face calculul erorilor ținând cont că  $U_D$  este o mărime calculată și nu măsurată experimental.

#### Observații:

- precizia de determinare a lui  $U_0$  depinde de precizia cu care este menținută constantă tensiunea pe diodă;
- tensiunea de polarizare a diodei se alege mică pentru a nu distruge bariera de potențial de contact;
- la astfel de polarizări nu trebuie să ne surprindă valorile rezistenței diferențiale de ordinul miilor de ohmi;
- voltmetrul electronic va fi pus pe scala de 20 V pentru că aici avem posibilitatea menținerii constante (cu precizie destul de bună) a unei tensiuni de ordinul sutimilor de volți ( $U_0 = 0,02; 0,03; \dots; 0,04; 0,05 V$ ).

## 6. Întrebări

1. Ce se întâmplă cu nivelurile Fermi la contactul M-S?
2. În ce constă efectul tunel?
3. Ce reprezintă nivelul energetic de vid?
4. Ce reprezintă afinitatea electronică.
5. Ce este lucrul de extracție?
6. De ce dreptele  $\ln[R_d / (k_B T)^{1/2}] = f\left(\frac{1}{T}\right)$  obținute la încălzire și la răcire nu se suprapun?
7. Cum ar trebui refăcut experimentul astfel încât dreptele (date de formula (6)) obținute la încălzire și la răcire să se suprapună?
8. Cum este definită rezistența diferențială?

## ANEXE

### Anexa I. Rezistența diferențială a diodei.

Intensitatea curentului care curge prin structura metal - semiconductor (M - S), poate fi determinată ca la o diodă cu vid, calculul având la bază teoria emisie termoelectronice.

Dacă structura metal - semiconductor (M - S) este polarizată direct cu tensiunea  $U$ , atunci curentul termoelectronic care curge dinspre semiconductor spre metal este:

$$I_{S \rightarrow M} = \frac{en_0\bar{v}}{4} \exp\left[-\frac{e(U_D - U)}{k_B T}\right] \quad (A1)$$

unde  $n_0$  este concentrația purtătorilor în semiconductor,  $\bar{v}$  este viteza medie a electronilor,  $k_B = 1.38 \times 10^{-23} J/K$  constanta lui Boltzmann, iar  $T$  este temperatura.

Curentul metal - semiconductor este:

$$I_{M \rightarrow S} = \gamma \exp\left(-\frac{eU_D + E_{Fs}}{k_B T}\right) \quad (A2)$$

unde  $\gamma$  este o constantă, iar  $E_{Fs}$  este energia nivelului Fermi în semiconductor.

La echilibru termic ( $U = 0$ ) avem  $I_{S \rightarrow M} = I_{M \rightarrow S}$ , iar din (A1) și (A2) rezultă:

$$\gamma = \frac{en_0\bar{v}}{4} \exp\left(\frac{E_{Fs}}{k_B T}\right) \quad (A3)$$

Înlocuind (A3) în (A2) rezultă:

$$I_{M \rightarrow S} = \frac{en_0\bar{v}}{4} \exp\left(-\frac{eU_D}{k_B T}\right) \quad (A4)$$

Curentul care curge prin structura (M-S) este egal cu diferența netă a curentilor termoelectrice (A1) și (A4):

$$I = I_{S \rightarrow M} - I_{M \rightarrow S} = \frac{en_0\bar{v}}{4} \exp\left(-\frac{eU_D}{k_B T}\right) \left[ \exp\left(\frac{eU}{k_B T}\right) - 1 \right] = I_S \left[ \exp\left(\frac{eU}{k_B T}\right) - 1 \right] \quad (A5)$$

$$\text{unde } I_S = \frac{en_0\bar{v}}{4} \exp\left(-\frac{eU_D}{k_B T}\right) \quad (A6)$$

Rezistența diferențială se obține ca inversul derivatei curentului (A5) în raport cu tensiunea:

$$R_d = \left(\frac{dI}{dU}\right)^{-1} = \frac{k_B T}{eI_S} \exp\left(-\frac{eU}{k_B T}\right) = \frac{4k_B T}{en_0\bar{v}} \exp\left(\frac{e(U_D - U)}{k_B T}\right) \quad (A7)$$

unde  $I_S = \frac{en_0\bar{v}}{4} \exp\left(-\frac{eU_D}{k_B T}\right)$  este curentul de saturație, iar  $\bar{v}$  este viteza medie a purtătorilor de sarcină.



## Anexa II. Calculul erorilor.

Pentru determinarea pantei dreptei ce are ecuația generală  $y = ax + b$ , se poate aplica metoda celor mai mici pătrate.

Vom nota

$$y = \ln \frac{R_d}{(k_B T)^{1/2}}, \quad x = \frac{1}{T} \text{ și } a = \frac{e(U_D - U_0)}{k_B} \quad (\text{B1})$$

Considerând neglijabile erorile asupra variabilei  $x$ , conform metodei celor mai mici pătrate estimatele  $\bar{a}$  și  $\bar{b}$  ale mărimilor necunoscute  $a$  și  $b$  se obțin cu ajutorul relațiilor:

$$\bar{a} = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad \bar{b} = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (\text{B2})$$

unde  $x_i, y_i$  reprezintă numărul de perechi măsurate experimental.

Estimările dispersiilor pentru mărimile  $a$  și  $b$  sunt:

$$S_a^2 = \frac{n}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \cdot S_y^2 \quad S_b^2 = \frac{\sum x_i^2}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \cdot S_y^2 \quad (\text{B3})$$

unde abaterea pătratică medie  $S_y^2$  poate fi calculată cu relația:

$$S_y^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{b} - \bar{a} x_i)^2}{n - 2} \quad (\text{B4})$$

Mărimile necunoscute  $a$  se poate exprima în funcție de estimatul său și de estimatul dispersiei conform relației:

$$a = \bar{a} \pm S_{\bar{a}} \quad (\text{B5})$$

Mărimile  $U_D$  se va exprima sub forma finală:

$$U_D = \bar{U}_D \pm S_{\bar{U}_D} \quad (\text{B6})$$

Deoarece  $U_D = f(a)$ ,

$$S_{\bar{U}_D}^2 = \left( \frac{\partial U_D}{\partial a} \right)^2 \Bigg|_{a=\bar{a}} S_{\bar{a}}^2 \quad (\text{B7})$$