

CZU: 538.9

DISPOZITIV PENTRU STUDIUL DEPENDENȚEI DE TEMPERATURĂ A CONDUCTIVITĂȚII ELECTRICE LA STRATURILE SUBȚIRI SEMICONDUCTOARE

Mihail Popa (Universitatea de Stat „Alecu Russo”, R. Moldova)

Gheorghe Ioan Rusu (Universitatea „Al. I. Cuza, România)

În lucrare se descrie construcția și principiul de funcționare a unui dispozitiv experimental utilizat pentru măsurarea rezistenței electrice a straturilor subțiri semiconductoare la diferite temperaturi. De asemenea, se prezintă metodica determinării conductivității electrice și a altor parametri caracteristici straturilor subțiri.

Introducere

Dintre parametrii caracteristici ai materialelor semiconductoare, cel mai intens studiată în prezent este conductivitatea electrică.

Depinzând de o serie de factori ale căror acțiuni nu pot fi separate (forma și dimensiunile eșantionului, valoarea tensiunii electrice aplicate, temperatura, presiunea, natura materialului din care sunt confecționați electrozii, natura și presiunea gazului din incinta de măsurare etc.), măsurarea conductivității electrice a straturilor subțiri semiconductoare constituie o problemă deosebit de dificilă.

Marea majoritate a datelor experimentale referitoare la conductivitatea sau rezistivitatea electrică a straturilor subțiri se obțin în urma măsurărilor efectuate în curent continuu prin metoda celor două sonde [1].

Prin utilizarea metodei celor patru sonde se obțin date mai sigure, însă în cazul straturilor subțiri, folosirea acestora este de multe ori limitată de existența la suprafața lor a unui strat de sarcină spațială care influențează mult precizia măsurărilor [1].

Scopul acestei lucrări este de a prezenta construcția și principiul de funcționare a unui dispozitiv experimental utilizat pentru determinarea conductivității electrice a straturilor subțiri semiconductoare la diferite temperaturi. De asemenea, este important de a prezenta metodica de determinare și a altor parametri caracteristici straturilor subțiri.

Considerații teoretice

Conductivitatea electrică constituie un parametru important în studiul fenomenelor de transport ale straturilor subțiri semiconductoare.

Într-un semiconductor conductivitatea electrică este egală cu suma conductivităților electrice datorate electronilor σ_n și a golurilor σ_p [2-4], adică

$$\sigma_i = \sigma_n + \sigma_p = ne\mu_n + pe\mu_p, \quad (1)$$

unde μ_n și μ_p reprezintă mobilitatea electronilor și, respectiv, a golurilor, iar n și p – concentrațiile purtătorilor de sarcină respectivi.

Pentru un semiconductor intrinsec concentrațiile celor două tipuri de sarcină sunt egale

$$n = p = n_i \quad (2)$$

și în consecință relația (1) devine:

$$\sigma_i = ne(\mu_n + \mu_p). \quad (3)$$

În domeniul conducției intrinseci concentrația electronilor liberi din banda de conducție și respectiv a golurilor din banda de valență se poate exprima prin relația [2, 3]

$$n = p = \sqrt{N_C N_V} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right), \quad (4)$$

unde N_C și N_V reprezintă densitățile efective de stări în benzile respective, k_B – constanta Boltzmann, iar E_g – lărgimea benzii interzise.

În domeniul temperaturilor mai mari predomină împrăștierea purtătorilor pe vibrațiile rețelei și dependența de temperatură a mobilităților se poate scrie sub forma [2-4]

$$\mu_n = B_n T^{\frac{3}{2}} \text{ și } \mu_p = B_p T^{\frac{3}{2}}, \quad (5)$$

în care parametrii B_n și B_p , practic, nu depind de temperatură.

Înlocuind relațiile (5) și (4) în (3) obținem:

$$\sigma_i = \left[e\sqrt{N_C N_V} (B_n T^{\frac{3}{2}} + B_p T^{\frac{3}{2}}) \right] \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right). \quad (6)$$

Notăm cu σ_0 expresia din parantezele pătrate ale relației (6). Aceasta reprezintă o constantă caracteristică fiecărui semiconductor. Astfel, relația (6) poate fi scrisă sub forma [2-4]

$$\sigma_i = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B \cdot T}\right) \quad (7)$$

Dependența conductivității electrice de temperatură, descrisă de relația (7), este comod să fie reprezentată grafic în coordonate semilogaritmice.

Logaritmăm relația (7) și obținem:

$$\ln \sigma_i = \ln \sigma_0 - \frac{E_g}{2k_B} \cdot \frac{1}{T}. \quad (8)$$

De regulă, expresia (8) se scrie sub forma:

$$\ln \sigma_i = \ln \sigma_0 - \frac{E_g}{2k_B \cdot 10^3} \cdot \frac{10^3}{T}. \quad (8')$$

Reprezentând această dependență în coordonate $(\ln \sigma, \frac{10^3}{T})$, se obține o dreaptă care intersectează axa ordonatelor în punctul $\ln \sigma_0$ (Fig.1), iar panta porțiunii liniare a dependenței $\ln \sigma_i = f\left(\frac{10^3}{T}\right)$ este egală cu $\frac{E_g}{2k_B \cdot 10^3}$:

$$\frac{[\ln \sigma_2 - \ln \sigma_1]}{\left(\frac{10^3}{T_2} - \frac{10^3}{T_1}\right)} = -\frac{[\ln \sigma_2 - \ln \sigma_1]}{\left(\frac{10^3}{T_1} - \frac{10^3}{T_2}\right)} = -\frac{E_g}{2k_B \cdot 10^3}. \quad (9)$$

În acest caz, lărgimea benzii interzise, E_g , se poate calcula după relația:

$$E_g = 2k_B \cdot 10^3 \frac{[\ln \sigma_2 - \ln \sigma_1]}{\left(\frac{10^3}{T_1} - \frac{10^3}{T_2}\right)} \quad (10)$$

Înlocuind în relația (10) constanta lui Boltzmann ($k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{J/K} = 8,6172 \text{eV/K}$) se obține o relație care dă valoarea lui E_g în eV:

$$E_g \cong 0,1725 \frac{[\ln \sigma_2 - \ln \sigma_1]}{\left(\frac{10^3}{T_1} - \frac{10^3}{T_2}\right)}, \text{eV}. \quad (11)$$

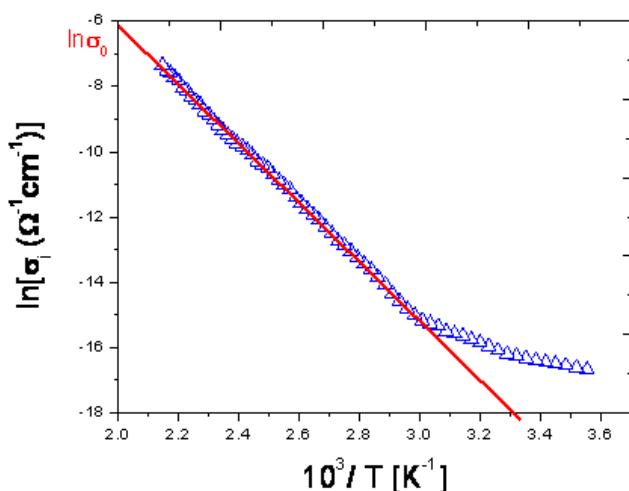


Fig. 1. Dependența de temperatură a conductivității electrice pentru un strat subțire semiconductor.

Detalii experimentale

Pentru determinarea conductivității electrice a straturilor subțiri, rezistența electrică a acestora a fost măsurată în mod direct cu un megaohmmetru, conectat prin intermediul cablurilor ecranate (14) la sondele de măsură (11) (Fig. 3), iar temperatura probei a fost determinată cu ajutorul unui termocuplu de cupru-constantan (12) fixat pe suprafața stratului (Fig. 3) [5].

Rezistivitatea electrică a unui strat subțire poate fi determinată din relația:

$$\rho = R \frac{A}{l}, \quad (12)$$

unde A este aria secțiunii transversale, $A = d \cdot L$, d este grosimea stratului, L – lățimea stratului, iar l – lungimea stratului (distanța dintre electrozi) (Fig. 2). Obținem

$$\rho = R \frac{d \cdot L}{l}, \quad (13)$$

și, respectiv, conductivitatea electrică

$$\sigma = \frac{l}{d \cdot L} \cdot \frac{1}{R}. \quad (14)$$

Temperatura stratului subțire de ZnSe a fost calculată din relația

$$T_{str} = T = \frac{U_s(mV)}{\alpha_s} + T_{cam} + 273,15 \text{ (K)}, \quad (15)$$

unde $\alpha_s = 0,033 \text{ mV/}^\circ\text{C}$ reprezintă coeficientul Seebeck pentru termocuplu de cupru-constantan, iar T_{cam} este temperatura camerei.

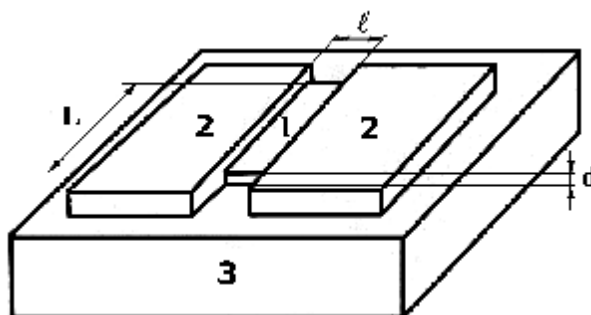


Fig. 2. Schița unui eșantion: 1 – strat subțire de ZnSe; 2 – electrozi de In; 3 – suport de sticlă.

Descrierea dispozitivului experimental

Pentru studiul dependenței de temperatură a conductivității electrice, în laboratorul Fizica Semiconductorilor, Catedra Fizica Corpului Solid, Universitatea „Al. I. Cuza” din Iași, România, s-a proiectat și construit dispozitivul experimental prezentat schematic în fig. 3 și 4 [5].

Partea principală a acestuia o constituie corpul (1) fixat pe un suport (2), iar pe acesta prin intermediul a patru tije metalice (13) se instalează un cuptor electric (3).

Contactele cu electrozii eșantionului se realizează cu ajutorul unor sonde (11) (cu suprafață mare de contact), fixate pe niște suporturi mobile (10) care pot aluneca pe un ax orizontal (9), modificându-se astfel distanța dintre sonde. Sistemul de susținere suport-sonde (8) este atașat unui braț mobil (5), care se poate roti în plan vertical și orizontal, fiind acționat de o manetă (6). Drumul de culisare a brațului mobil este strict determinat de o canelură (7) practică în peretele cilindric al corpului metalic (1).

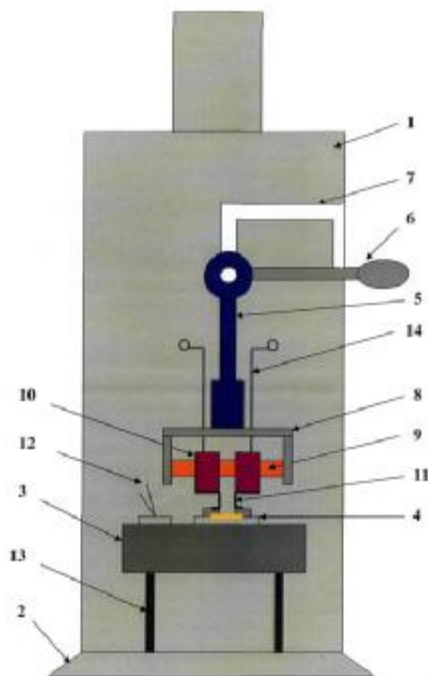


Fig. 3. Dispozitivul experimental (vedere din față). Elemente componente: 1 – corpul dispozitivului, 2 – suportul dispozitivului, 3 – cuptorul electric, 4 – eșantion (suport + strat + electrozi), 5 – braț mobil, 6 – maneta de acționare a brațului mobil, 7 – drum culisare braț – mobil, 8 – sistem de susținere suport-sonde, 9 – tijă izolatoare, 10 – suportii sondelor, 11 – sonde electrice, 12 – termocuplu, 13 – picioarele cuptorului electric, 14 – cabluri ecranate.

Rezistența electrică a straturilor subțiri poate fi măsurată cu ohmmetre de precizie, care contactează cu sondele electrice (11) prin intermediul cablurilor ecranate (14). Pentru măsurări directe noi am folosit un multimetru KEYTHLEY 2010 care poate măsura rezistențe electrice cu valori cuprinse între $10^{-6}\Omega$ și $10^8\Omega$ (cu o rezoluție pentru valoarea maximă de 10Ω), iar pentru probe cu rezistențe electrice mai mari de $10^7\Omega$ se poate folosi un electrometru de tip KEITHLEY 6517A, care poate măsura rezistențe maxime de $10^{14}\Omega$.

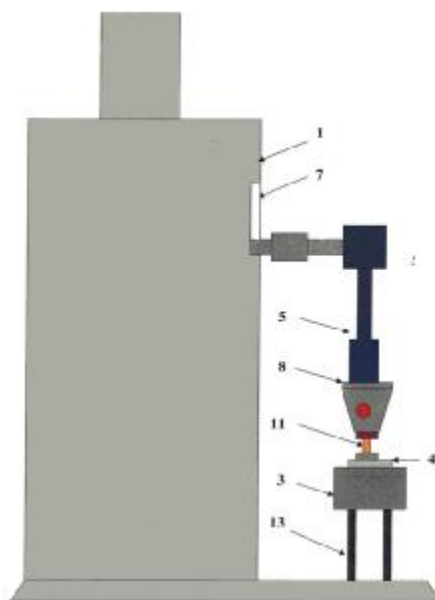


Fig. 4. Dispozitivul experimental (vedere dintr-o parte). Elemente componente: 1 – corpul dispozitivului, 3 – cuptorul electric, 4 – eșantion (suport + strat + electrozi), 5 – braț mobil, 7 – drum culisare braț – mobil, 8 – sistem de susținere suporti-sonde, 11 – sonde electrice, 13 – picioarele cuptorului electric.

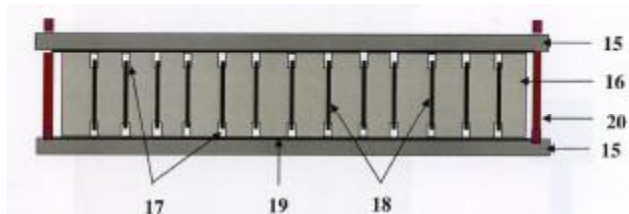


Fig. 4. Cuptorul electric. Elemente componente: 15 – plăci metalice, 16 – placă de steatit, 17 – caneluri, 18 – sîrmă de kantal, 19 – foie subțiri de mică, 20 – șuruburi de fixare.

Cuptorul (3) pentru încălzirea probelor a fost confecționat dintr-o placă de steatit (16) (Fig.4), în care au fost practicate (înainte de a fi tratată termic) o serie de caneluri (17), prin care a fost bobinată o sârmă

de kantal (18) cu diametrul de 0,5 mm. Placa de steatit (16) a fost izolată de plăcile metalice (15) cu ajutorul unor foițe subțiri de mică (19). Cu ajutorul șuruburilor (20) elementele cuptorului electric se fixează într-o anumită poziție.

Alimentarea cuptorului electric se face cu un autotransformator, ce permite obținerea temperaturii de circa 500-600K. În scopul uniformizării temperaturii, placa metalică (15) prezintă o suprafață mare.

Concluzii

Dispozitivul experimental descris în lucrare are o serie de avantaje față de alte dispozitive bazată pe metoda celor două sonde:

- 1) maneta (6) are o lungimea ce permite culisarea lină a brațului mobil;
- 2) sondele electrice (11) asigură un contact destul de bun cu eșantionul, nedeteriorând suprafața acestuia;
- 3) cuptorul electric permite încălzirea eșantioanelor până la 500-600K;
- 4) dispozitivul poate fi utilizat și în incinte izolate, adică în condiții diferite de temperatură și presiune.

Bibliografie

1. Spînulescu, I., *Fizica straturilor subțiri și aplicațiile acestora*, București: Ed. Științifică, 1975, 458 p.
2. Rusu, G.I., Rusu, I., Stamate, Marius, *Introducere în fizica semiconductorilor*, v.1, Bacău, Ed. „Plumb”, 1997, 244 p.
3. Nicolaescu, I.I., *Introducere în fizica corpului solid*, Pitești, Ed. „Cultura”, 1997, 648 p.
4. Епифанов, Г.И., *Физика твердого тела*, Москва, Высшая школа, 1975. 223p.
5. Popa, M. E., *Contribuții la studiul proprietăților electrice și optice ale unor compuși semiconductori binari în straturi subțiri: Rezumatul tezei de doctorat*, Universitatea “Al. I. Cuza”, Iași, 2003. – 56p.