

# MECANISMELE DE ÎMPRĂȘTIERE A PURTĂTORILOR DE SARCINĂ ÎN ANTIMONIDUL DE GALIU NEDOPAT

A. Mihălache

Universitatea de Stat din Tiraspol, Moldova

## ÎNTRUDUCERE

Antimonidul de galiu este un material semiconductor din grupa A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> cu proprietăți fizice neobișnuite: toate procedurile tehnologice folosite nu ne permite modificarea conductivității electrice; structura de benzi energetice neobișnuite. Proprietățile electrice ale antimonidului de galiu au fost studiate în mai multe lucrări ca exemplu [1, 2].

Pentru analiza datelor experimentale s-au folosit cunoscutele mecanisme de împrăștiere: interacțiunea purtătorilor de sarcină cu centrele de impurități ionizate și impurități neutre, interacțiunea purtătorilor de sarcină cu defecte ale rețelei cristaline, interacțiunea purtătorilor de sarcină cu fononi optici și acustici.

Fiecare din mecanismele de împrăștiere își aduce contribuția sa la împrăștierea purtătorilor de sarcină și determină mobilitatea purtătorilor de sarcină. Mobilitatea sumară  $\mu$  se determină din relația.

$$\frac{1}{\mu} = \sum \frac{1}{\mu_i}$$

Pentru elucidarea mecanismelor de împrăștiere ale purtătorilor de sarcină pentru antimonidul de galiu nedopat au fost calculate dependența purtătorilor de sarcină în raport cu temperatură  $\mu(T)$  și în raport cu concentrația  $\mu(n)$  pentru următoarele mecanisme de împrăștiere a purtătorilor de sarcină: mobilitatea condiționată de împrăștierea purtătorilor de sarcină pe impurități ionizate, mobilitatea condiționată de împrăștierea purtătorilor de sarcină pe oscilațiile acustice ale rețelei cristaline, mobilitatea condiționată de împrăștierea pe oscilațiile optice ale rețelei cristaline cu implicarea  $m_p^* = 0.55m_0$ .

Mobilitatea purtătorilor de sarcină determinate într-un fel sau altul de mecanisme de împrăștiere al purtătorilor de sarcină pentru majoritatea mecanismelor de împrăștiere au dependență de temperatura cristalului. Mobilitatea condiționată de împrăștierea purtătorilor de sarcină pe centre ionizate  $\mu_i \sim T^{3/2}$ . Împrăștierea purtătorilor de sarcină pe oscilațiile rețelei care determină

valoarea  $\mu_o$ , include în sine împrăștierea pe fononi optici  $\mu_{op}$ , împrăștierea pe fononi acustici  $\mu_{ac}$  unde valoarea  $\mu_{ac} \sim T^{-3/2}$ ,  $\mu_{op} \sim T^{1/2}$ .

## REZULTATE EXPERIMENTALE ȘI DISCUȚIA LOR

Mobilitatea condiționată de împrăștierea purtătorilor de sarcină pe impurități ionizate se calculează utilizând relațiile:

$$\mu_i = \frac{2^{1/2} \cdot (4\pi\epsilon\epsilon_0)^2 \cdot (k_B T)^{3/2}}{\pi^{3/2} \cdot Z^2 \cdot e^3 \cdot \sqrt{m} \cdot N_i \cdot [\ln(1 + \beta^2)]} \quad (1)$$

Mobilitatea determinată în unități de măsură  $\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$  se calculează utilizând relațiile:

$$\mu_i = \frac{3,068 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}}{N_i} \cdot \frac{1}{Z^2} \cdot \left(\frac{\epsilon}{16}\right)^2 \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^{3/2} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{m^*}{m_0} \ln(1 + \beta^2)}} \quad (2)$$

Unde:

$$\beta = \frac{1}{Z} \cdot \frac{\epsilon}{16} \cdot \frac{T}{100K} \left( \frac{2,35 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}}{N_i} \right)^{1/3} \quad (3)$$

$N_i$  - concentrația impurităților ionizate;  
 $\epsilon$  - permeabilitatea dielectrică statică;  
 $T$  - temperatura absolută;  
 $m^*$  - masa efectivă a golurilor;  
 $m_0$  - masa de repaus a electronului;  
 $Z$  - numărul de sarcină al impurităților.

La calcule, au fost folosite următoarele valori ale parametrilor pentru GaSb:

$\epsilon = 15,6$ ;  $\epsilon_0 = 14,44$ ;  $m^* = 0,55m_0$ ;  $m_0 = 9,11 \cdot 10^{-31}$ ;  $Z = 1$ .

La temperaturi înalte se poate considera:

$$\mu_i \approx T^{3/2} \quad (4)$$

Din formula (4) se observă că mobilitatea purtătorilor de sarcină condiționată de împrăștierea pe impurități ionizate, se micșorează la scăderea temperaturii. Aceasta se întâmplă deoarece cu creșterea temperaturii cristalului se mărește viteza termică a purtătorilor de sarcină, dar aceasta duce la diminuarea interacțiunii purtătorilor de sarcină cu atomii impuri ionizați, deoarece se micșorează durata interacțiunii. Cu excepția, că la temperatura dată, mobilitatea se micșorează odată cu creșterea concentrației impurităților care duce la mărirea efectului împrăștierii.

Mobilitatea condiționată de împrăștierea pe oscilațiile acustice ale rețelei cristaline se calculează conform relațiilor:

$$\mu_{ac} = \frac{2 \cdot \sqrt{2\pi}}{3} \cdot \frac{e \cdot \hbar^4 \cdot C_L}{m^{5/2} \cdot k_B^{3/2} \cdot E_A^2 \cdot T^{3/2}} \quad (5)$$

Mobilitatea determinată în unități de măsură  $\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$  se calculează utilizând relația:

$$\mu_{ac} = \frac{3,06 \cdot 10^4 \cdot C_L}{\left(\frac{m^*}{m_0}\right)^2 \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^{3/2} \cdot E_A^2 \cdot 10^{12}} \quad (6)$$

$E_A$  – energia oscilațiilor acustice;

$C_L$  – coeficientul longitudinal de elasticitate.

La calcule, au fost folosite următoarele valori ale parametrilor pentru GaSb:

$E_A=4 \text{ eV}$ ;  $C_L=0,64 \cdot 10^{12} \text{ dyn/cm}^2$ ;  $m^*=0,55 \cdot m_0$

Din formula (6) rezultă că mobilitatea purtătorilor de sarcină la împrăștierea pe oscilațiile termice a rețelei se micșorează la creșterea temperaturii. Mai mult ca atât, mobilitatea este invers proporțională cu masa efectivă a purtătorilor de sarcină la puterea 5/2 de aceea purtătorii de sarcină cu masa efectivă mică posedă mobilitate mare.

Mobilitatea condiționată de împrăștierea pe oscilațiile optice ale rețelei cristaline se calculează conform relațiilor:

$$\mu_{op} = 2,6 \cdot 10^5 \cdot \frac{8 \cdot \sqrt{T/(9\pi\theta)} \cdot \exp(\theta/T)}{a \cdot \theta \cdot \left(\frac{m^*}{m_0}\right)} \quad (7)$$

$a$  - constanta polară ce se determină din relația:

$$a = 397,4 \cdot \sqrt{\frac{m^*/m_0}{\theta}} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_{op}} - \frac{1}{\varepsilon}\right) \quad (8)$$

$\theta$  -temperatura Debye;

$\varepsilon_{op}$ -permiabilitatea dielectrică optică.

La calcule, au fost folosite următoarele valori ale parametrilor pentru GaSb:

$\theta=340 \text{ K}$ ;  $\varepsilon_{op}=14,14$ ;  $\varepsilon=15,6$ ;  $m^*=0,55 \cdot m_0$

Mobilitatea condiționată de împrăștierea pe impurități neutre se calculează conform relațiilor:

$$\mu_n = \frac{e}{20 \cdot a_B \cdot \hbar} \cdot \frac{m}{m_0} \cdot \frac{1}{\varepsilon \cdot N^*} \quad (9)$$

Această mobilitate nu depinde de temperatură. În unități  $\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$  avem:

$$\mu_n = \frac{1,44 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}}{N^*} \cdot \frac{m^*}{m_0} \cdot \frac{1}{\varepsilon} \quad (10)$$

$N^*$  - concentrația impurităților neutre.

Cu cât este mai mare permeabilitatea dielectrică cu atât este mai intensivă împrăștierea pe impurități neutre, este mai mică și împrăștierea pe impurități ionizate.

Mobilitatea condiționată de împrăștierea piezoelectrică se calculează conform relațiilor:

$$\mu_{pz} = \frac{16 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}}{3} \cdot \frac{\hbar \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0}{m^{3/2} \cdot e \cdot K^2 \cdot (R_B^2 \cdot T)^{1/2}} \quad (11)$$

$K$ -coeficientul de legătură electromecanic determinat conform relației:

$$K^2 = \frac{e_{pz}^2 / C_l}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 + (e_{pz}^2 / C_l)} \quad (12)$$

Sau în unități de măsură  $\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$

$$\mu_{pz} = 2,6 \cdot \frac{\varepsilon}{\left(\frac{m^*}{m_0}\right)^{3/2} \cdot K^2 \cdot \sqrt{\frac{T}{100}}} \quad (13)$$

La calcule, au fost folosite următoarele valori ale parametrilor pentru GaSb:

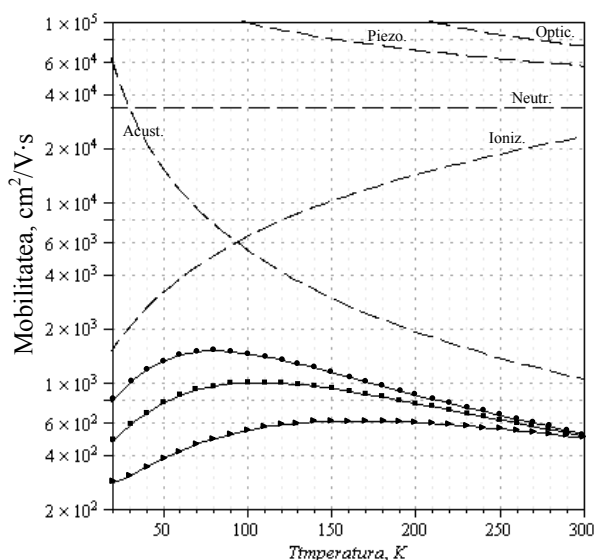
$\varepsilon=15,6$ ;  $m^*=0,55 \cdot m_0$ ;  $K=10^{-3}$

Mecanismele de împrăștiere posedă un caracter complicat. Dacă presupunem că toate mecanismele de împrăștiere sunt independente, atunci probabilitatea împrăștierii totale este egală cu suma împrăștierii pe fiecare tip al centrelor de împrăștiere.

Bineînțeles că, contribuția diferitor mecanisme de împrăștiere în timpul total al relaxării depinde de temperatura cristalului. Pe măsura modificării energiei purtătorilor de sarcină rolul unor mecanisme de împrăștiere se micșorează, dar a altor crește, de aceea caracterul mișcării purtătorilor de sarcină sub acțiunea câmpului electric interior depinde de faptul a căror mecanisme de împrăștiere este dominant în intervalul dat de temperatură. La temperaturi foarte mici se poate considera numai împrăștierea pe atomii impurități și dislocații. Cu mărirea temperaturii rolul acestor mecanisme se micșorează în comparație cu împrăștierea pe impurități ionizate. La temperaturi înalte dominant devine împrăștierea pe fononi. De aceea se poate considera că mobilitatea combinată se determină împrăștierii pe impurități ionizate și pe fononi conform ecuației:

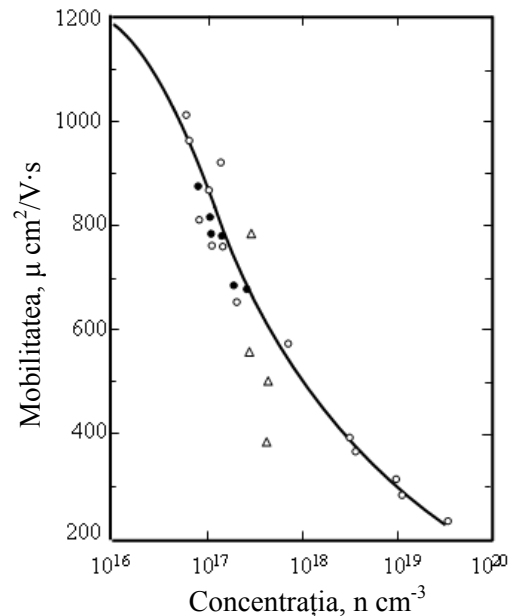
$$\frac{1}{\mu} = \left( \frac{1}{\mu_i} + \frac{1}{\mu_{ac}} + \frac{1}{\mu_{op}} + \frac{1}{\mu_n} + \frac{1}{\mu_{pz}} \right) \quad (14)$$

În figura 1 sunt prezentate spectrele mobilității gurilor al antimonidului de galiu în raport cu temperatura pentru probele cu concentrația gurilor măsurate la 300 K  $n_1 = 1,5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $n_2 = 2,28 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  și  $n_3 = 1,3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  iar în figura 2 este prezentat dependența mobilității purtătorilor de sarcină în raport de concentrația gurilor.



**Figura 1.** Spectrul mobilităților purtătorilor de sarcină în antimonidul de galiu nedopat. Concentrația gurilor la temperatura 300 K, este:  $n_1 = 1,5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  ● - date experimentale;  $n_2 = 2,28 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  ■ - date experimentale;  $n_3 = 1,3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  ▼ - date experimentale.

Liniile segmentate-calculare teoretice utilizând formulele (2, 6, 7, 10, 13) pentru  $n_1 = 1,5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ; liniile continuii-calculare teoretice utilizând formula (14).



**Figura 2.** Dependența mobilității purtătorilor de sarcină față de concentrația gurilor pentru GaSb la 300 K.

## CONCLUZII

Calculare teoretice confirmă că rolul principal la împrăștierea gurilor la temperaturi joase aparține impurităților ionizate, își aduc aportul și alte mecanisme, la temperaturi mai ridicate de (100-150 K) rolul principal în împrăștiere îi aparțin fononilor optici și acustici. În favoarea acestor concluzii vorbesc și datele experimentale a dependenței mobilității gurilor de concentrația lor. Datele experimentale discutate în această lucrare sunt în bună concordanță cu cele cunoscute în literatura de specialitate [3].

## Bibliografie

1. **Lobo, P.** Msc thesis Macquarie University. Australia, 1998.
2. **Dutta, P., Prasad, V. Bhat, H. and Kumar, V.** J. Appl. Phys. 80. pp 2847, 1996.
3. **Johnson, G., et al** 1988 Semicond. Sci. Technol. 3 1157-1165.