

C.Z.U. 538.911

PROPRIETĂȚILE FIZICE ALE ANTIMONIDULUI DE GALIU DOPAT CU FIER

Eugen Gheorghiuță, Igor Postolachi, Leonid Guțuleac, Olga Zlotea
(Universitatea de Stat din Tiraspol, Republica Moldova)

S-au studiat condițiile tehnologice de obținere, omogenizare și purificare a antimonidului de galiu dopat cu fier. În baza cercetărilor proprietăților galvanomagnetice ale antimonidului de galiu nedopat și dopat cu fier în concentrații de până la 3% atomice pentru intervalul de temperaturi ($4,2 \div 300\text{K}$) s-au analizat mecanismele de împrăștiere a purtătorilor de sarcină. Se demonstrează că pentru explicarea datelor experimentale obținute pentru funcția $U=U(T)$ este necesară aplicarea unui mecanism suplimentar de împrăștiere a purtătorilor de sarcină specific incluziunilor formate în antimonidul de galiu – clustere. Cu ajutorul acestui mecanism s-au calculat caracteristicile de bază ale împrăștierii purtătorilor de sarcină determinate de clustere.

Introducere

Problema comportării dopanților din grupa elementelor de tranziție, spre exemplu Fe, Ni, Cr, Mn, în antimonidul de galiu este actuală și controversată. Sunt cunoscute doar două lucrări în care se analizează particularitățile proprietăților fizice ale antimonidului de galiu dopat cu fier [1] și dopat cu mangan [2]. În lucrarea [2] se demonstrează că manganul formează în antimonidul de galiu incluziuni orientate de-a lungul direcției deplasării zonei topite, care modifică mecanismele de împrăștiere a purtătorilor de sarcină. Proprietățile fizice ale antimonidului de galiu dopat cu elemente din grupa de tranziție, practic, nu sunt studiate.

În prezenta lucrare se analizează proprietățile fizice ale antimonidului de galiu dopat cu fier în diapazonul de concentrații ($0,01 \div 3\%$ atomare) și intervalul de temperaturi ($4,2 \div 300\text{K}$).

Rezultatele experimentale și discuția lor

Antimonidul de galiu, dopat și nedopat, studiat în această lucrare s-a obținut printr-un proces tehnologic, derulat în următoarele etape: sinteza antimonidului de galiu în eprubete evacuate din cuarț optic din elementele (galiu, stibiu) pure și dopantul fier concentrații prestabilite; containerului cu componentele respective a fost instalat în cuptorul electric în care se menținea temperatura 900°C conectat cu un vibrator mecanic de frecvența 50Hz. În condițiile tehnologice enunțate mai sus, procesul de sinteză a durat 24 ore, apoi cuptorul electric cu containerul în care a decurs sinteza s-a răcit în regim liber. Următoarea etapă a procesului tehnologic de obținere a antimonidului de galiu este omogenizarea și procesul de creștere a monocristalelor în instalația de topire zonală.

Pentru măsurările galvanomagnetice s-au pregătit eșantioane în formă de paralelipiped, prelucrate preliminar chimic cu 6 contacte sudate. În experiment, s-

au măsurat conductivitatea electrică și efectul Hall. În baza acestor date, s-a calculat mobilitatea purtătorilor de sarcină. Toate probele studiate de antimoniduri de galiu, nedopat și dopat cu diferite concentrații de fier, au avut conductivitatea de tipul **p**. Concentrația impurităților în probele studiate variază în intervalul $(N_A - N_D) = (1,2 \div 3,0) \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

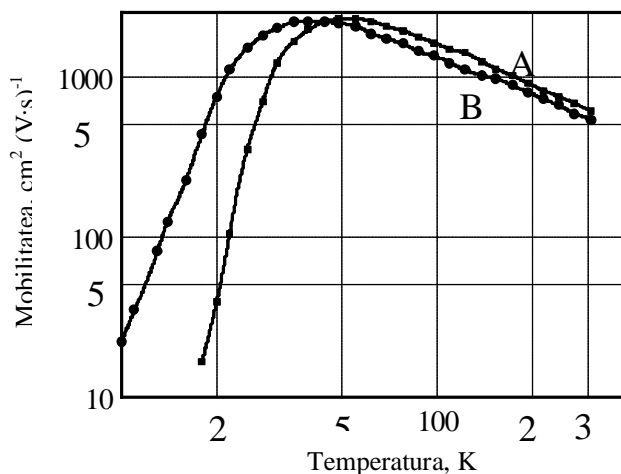


Fig. 1. Spectrul mobilității antimonidului de galiu nedopat (curba A) și dopat cu Fe în concentrație 0,01% atomice (curba B).

În figura 1 sunt prezentate dependențele mobilităților purtătorilor de sarcină de temperatură pentru două eșantioane: antimonidul de galiu nedopat (consemnată convențional F-0) curba A, antimonidul de galiu dopat cu fier în concentrație de 0,01% atomice (proba F-2) curba B. Diapazonul de temperaturi este $4,2 \div 300 \text{ K}$.

Comparând spectrele mobilităților pentru probele A și B, observăm că doparea GaSb cu fier duce la o modificare considerabilă a dependenței mobilității de temperatură în diapazonul temperaturilor joase (de până la cca 50K) și la o modificare neesențială pentru intervalul de temperaturi ridicate.

Se cunoaște [3] că mobilitatea purtătorilor de sarcină este influențată de diferite mecanisme de împrăștiere. La temperaturi joase predomină împrăștierea de către impuritățile ionizate, la temperaturi mai ridicate predomină împrăștierea de către oscilațiile rețelei cristaline (fononi acustici și fononi optici).

Studiile metalografice ale probelor obținute înregistrează incluziuni orientate de-a lungul deplasării zonei topite, care pot fi, după structură, niște combinații ale fierului cu oxigenul.

Analizându-se dependența mobilității de temperatură pentru diferite mostre, s-a observat că aceste mecanisme nu sunt suficiente pentru a explica dependența. Se cunoaște că în *GaSb* există tendința de formare a clusterilor (regiuni cu concentrare a sarcinilor spațiale). Mobilitatea este influențată deci de următoarele mecanisme de împrăștiere:

- 1) oscilații acustice ale rețelei;
- 2) oscilații optice ale rețelei;

3) clusteri (un mecanism suplimentar specific antimodnidului de galiu dopat cu fier).

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

$$U_i = \frac{3,68 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}}{N_i} \cdot \frac{1}{Z^2} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{16}\right)^2 \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{m^*}{m_0} \ln(1 + \beta^2)}}, \quad (1)$$

unde:

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

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

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

$$U_A = \frac{3,6 \cdot 10^4}{\left(\frac{m^*}{m_0}\right)^{\frac{5}{2}} \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot E_A^2} \cdot \frac{C_L}{10^{12}}, \quad (3)$$

unde: E_A - energia oscilațiilor acustice; C_L - coeficientul longitudinal de elasticitate.

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

$$U_o = \left(\frac{2,6 \cdot 10^{-5} \cdot \exp(\theta / T)}{\left(\frac{m^*}{m_0}\right) \cdot \sqrt{\theta} \cdot 397,4 \left(\frac{1}{\varepsilon_{op}} + \frac{1}{\varepsilon}\right)} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (4)$$

unde: θ - temperatura lui Debye; ε_{op} - permeabilitatea dielectrică optică.

Mobilitatea condiționată de împrăștierea de către clusteri se calculează astfel:

$$U_c = \frac{e}{N_c \cdot A \cdot \sqrt{2m \cdot k_B \cdot T}}, \quad (5)$$

unde: e - sarcina elementară; k_B - constanta Boltzmann; N_c - concentrația clusterilor; A - secțiunea efectivă a clusterilor.

Această formulă nu poate fi utilizată direct, deoarece nu se cunosc parametrii N_c și A (secțiunea depinde de temperatură). La calcule, poate fi folosită o formulă empirică aproximativă:

$$U_c = \frac{b}{T^a}, \quad (6)$$

unde parametrii β și α pot fi determinați prin metode numerice.

În cazul acțiunii mai multor mecanisme, mobilitatea se calculează astfel:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{f} \left(\frac{1}{U_i} + \frac{1}{U_A} + \frac{1}{U_o} + \frac{1}{U_c} \right), \quad (7)$$

unde f este un factor ce caracterizează partea de spațiu ocupată de clusteri.

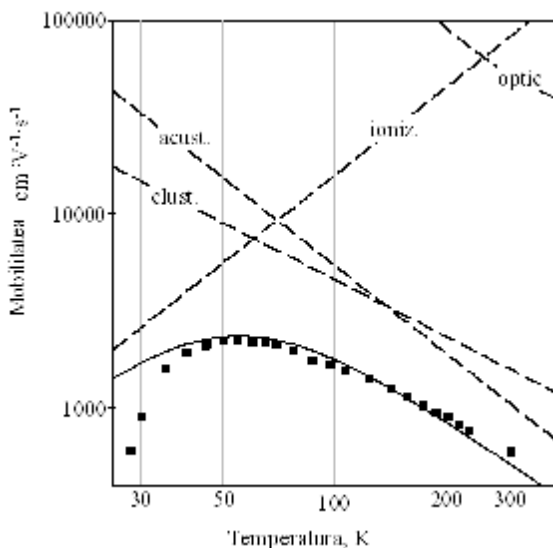


Fig.2. Spectrul mobilității purtătorilor de sarcină în antimonidul de galiu nedopat: linii segmentate – calcule teoretice utilizând formulele (1,2,3,4,5); ■ – date experimentale; linia continuă – calcule teoretice utilizând formula (7).

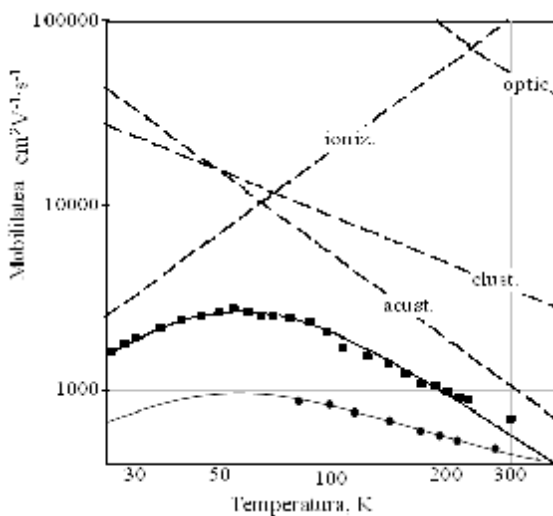


Fig.3. Dependența mobilității purtătorilor de sarcină în antimonidul de galiu dopat cu fier în concentrația 0,03% atomice (■) și 2% atomice (●): linii segmentate – calcule teoretice utilizând formulele (1,2,3,4,5); puncte – date experimentale; linia continuă – calcule teoretice utilizând formula (7).

Mărimile α , β , f au fost determinate prin metode numerice de analiză regresională astfel încât mobilitatea teoretică calculată prin formula (7) să coincidă cu cea experimentală. La calcule, au fost folosite următoarele valori ale parametrilor pentru $GaSb$:

$$Z = 1; \varepsilon = 15,6; \varepsilon_{op} = 14,44; m^* = 0,55 \cdot m_0; E_A = 4eV; \theta = 340 K; C_L = 0,64 \cdot 10^{12} \text{ dyn/cm}^2.$$

În figura 2 sunt prezentate, drept exemplu, rezultatele obținute pentru mostra F-0 (antimonidul de galiu nedopat). Rezultatele experimentale sunt notate prin pătrățele, prin linii discrete sunt prezentate dependențele $U_I(T)$, $U_A(T)$, $U_O(T)$ și $U_S(T)$. Linia continuă exprimă dependența rezultantă $U_S(T)$ calculată prin formula (7). Se evidențiază o corelare suficientă a datelor experimentale cu calcule teoretice.

În figura 3 sunt prezentate spectrele mobilităților pentru eșantionul F-3 antimonidul de galiu dopat cu 0,03% atomice de fier. Calculele teoretice pentru mobilitatea integrală corespund formulei (7). În baza principiilor expuse în lucrarea [3] și a rezultatelor experimentale pentru antimonidul de galiu au fost estimați principalii parametri ai clusterilor: V_S – volumul; R_S – raza; N_S – concentrația clusterilor. În calcule s-a presupus că clusterii sunt identici și au sarcini determinate de $Z=35$ și au fost folosite formulele:

$$V_S = \frac{Z}{N_A - N_D}; \quad (8)$$

$$R_S = \left(\frac{3}{4} V_S \right)^{\frac{1}{3}}; \quad (9)$$

$$N_S = \frac{f}{V_S}; \quad (10)$$

$$m_s = e \left[N_S A \sqrt{2mkT} \right]^{-1}. \quad (11)$$

Ultima formulă corespunde teoriei clusterilor.

Rezultatele calculelor pentru parametrii clusterilor probelor studiate în această lucrare sunt prezentate în tabelul 1.

Tabelul 1.

Caracteristicile de bază ale clusterilor în antimonidul de galiu

Mostra	Dopant, (Fe) % at.	f	$N_A - N_D$, 10^{17} cm^{-3}	R_S , Å	V_S , 10^{-16} cm^3	N_S , 10^{15} cm^{-3}
F-0	0	0.83	1.7	536	2.1	4.0
F-1	0.005	0.81	1.9	517	1.8	4.4
F-2	0.01	0.72	2.2	492	1.6	4.5
F-3	0.03	0.56	2.1	500	1.7	3.4
F-4	0.10	0.67	3.1	439	1.1	5.9
F-5	0.30	0.72	2.5	472	1.4	5.1
F-6	1.00	0.55	3.6	418	1.0	5.7
F-7	2.00	0.62	4.2	397	0.8	7.4
F-8	3.00	0.81	6.3	347	0.6	14.6
FT-9	0.01+0.10 Te	0.69	2.2	492	1.6	4.3

Concluzii

1. S-a modificat tehnologia de obținere, omogenizare, purificare și dopare a antimonidului de galiu cu fier în concentrații de până la 3%; s-au studiat proprietățile galvanomagnetice ale antimonidului de galiu dopat cu fier și nedopat în intervalul de temperaturi (4,2 ÷ 300K).

2. S-au analizat mecanismele de împrăștiere a purtătorilor de sarcină în raport cu antimonidul de galiu nedopat. Rezultatele experimentale obținute ale dependenței $U=U(T)$ se explică prin aplicarea unui mecanism suplimentar de împrăștiere și formarea unor incluziuni numite clustere. Bazându-ne pe concepțiile expuse în lucrarea [4] s-au calculat toate caracteristicile de bază ale clusterelor: V_S – volumul ocupat de clustere, R_S – raza, N_S – concentrația, reieșind din presupunerea că clusterii sunt identici și au sarcini determinate de $Z=35$.

P.S. Autorii aduc sincere mulțumiri profesorului V.Ivanov-Omskii de la Institutul Fizico-Tehnic "A.Ioffe" Sankt-Petersburg pentru ajutorul acordat în efectuarea măsurătorilor la temperaturi joase și pentru discuțiile fructuoase.

Lucrarea este îndeplinită în cadrul programului de cercetări științifice finanțate din bugetul Republicii Moldova.

Bibliografie

1. Л.П.Круковская, И.Ф.Миронов, А.Н.Титков, ФТП, 1978, т12, с.689
2. Е.И.Георгицэ, В.И.Иванов-Омский, В.Ф.Мастеров, Ф.М.Мунтяну, ФТП, 1991, т25, В.9, с.1589
3. Т.И.Воронина, Б.Е.Джуртанов, Т.С.Лагунова, М.А.Сиповская, В.В.Шерстнев, Ю.П.Яковлев, ФТП, 1998, т32,с.278

PHISSYCAL PROPERTIES OF GALLIUM ANTIMONIDE DOPED WITH IRON

Eugen Gheorghita, Leonid Gutuleac, Igor Postolachi, Olga Zlotea
(Tiraspol State University, Republic of Moldova)

Technological conditions for obtaining, homogenizing and purifying gallium antimonide doped with iron were studied.

Mechanisms of charge carriers dispersion using the research results of galvanometric properties of gallium antimonide undoped and doped with iron in a concentration up to 3 atomic % in the temperature interval (4,2 ÷ 300K) were analyzed. It is demonstrated that the experimental results for function $U=U(T)$ were explained with the implication of an additional mechanism of dispersion determined by the formation of some inclusions called clusters. Using the physical conceptions of this mechanism the basic characteristics of charge carriers dispersion determined by clusters were calculated.

Prezentat la redacție la 15.09.07