

# PARTICULARITĂȚILE RELAXĂRII SPINULUI ELECTRONILOR ÎN ANTIMONIDUL DE GALIU DOPAT CU FIER

Andrian Gheorghită, Eugen Gheorghită, Leonid Guțuleac, Alexei Mihălache

Universitatea de Stat din Tiraspol cu sediul la Chișinău, Moldova

[e.gheorghita@mail.ru](mailto:e.gheorghita@mail.ru)

Abstract— The present paper analyzes the influence of iron upon mechanisms of the spin relaxation in the gallium antimonide, doped with iron in concentrations of up to 3% *at*. It is demonstrated, that the for low concentrations of the dopant, the experimental results are described in the Bir-Aronov-Pikus theoretical model. However, for the high concentrations of iron, the experimental results do not fit into the above mentioned model. It is assumed, that the divergence between the experimental and theoretical results are influenced by the system of clusters formed by the dopant which has a structure –  $FeGa_3$ .

## I. ÎNTRUDUCERE

În ultimii ani pentru domeniul de cercetare din fizica stării condensate considerabil a sporit interesul față de efectele de relaxare a spinului purtătorilor de sarcină în diferite materiale cu proprietăți de semiconductori și diferite structuri cu dimensiuni reduse. Interesul enunțat este determinat, în primul rând, de ideea creării calculatorului cuantic, de spintronică contemporană.

Studierea efectelor de relaxare a spinului electronilor de neechilibru este un instrument destul de sensibil de diagnosticare a proceselor modificării spectrului energetic al purtătorilor de sarcină în diferite materiale cu proprietăți de semiconductori. Experimental relaxarea spinului electronilor este înregistrat prin metoda orientării optice a purtătorilor de sarcină fotoexcitați [1], cunoscută ca efectul Hanle. În structura spectrului dinamicii spinului, obținut prin metoda orientării optice apar mecanisme noi de relaxare spinică, care nu se manifestă în metodele experimentale clasice, cum ar fi: rezonanța paramagnetică electronică, metode radiospectroscopice etc. Metoda orientării optice a purtătorilor de sarcină, permite înregistrarea timpului de relaxare spinică a electronilor din diapazonul  $(10^{-12} \div 10^{-9})$  s, ce este imposibil de înregistrat în alte experimente.

Accesibilitatea acestei metode pentru studiarea mecanismelor de relaxare spinică este cunoscută în literatura de specialitate [2]. Relaxarea spinică în antimonidul de galiu este studiată în lucrarea [3,4,5]. Dinamica spinului înregistrată prin metoda orientării optice în

antimonidul de galiu dopat cu mangan și fier pentru un interval îngust de concentrații a dopanților este prezentată în lucrările [4,6].

În literatura de specialitate se analizează patru metode teoretice de relaxare spinică a purtătorilor de sarcină specifice diferitor materiale și diferitor concentrații. Prezentăm concepțiile fizice cunoscute ca modele teoretice a relaxării spinice, și anume:

1. Electronul își poate schimba spinul împrăștiindu-se pe vre-un defect principal matricial al materialului cunoscut cu denumirea mecanismului Elliot– Yafet [7];
2. Pierderea spinului poate avea loc nu în timpul ciocnirilor, dar în intervalul dintre două împrăștieri consecutive. Acest mecanism a fost propus de către Dyakonov și Perel [8], care apare în materialele semiconductoare fără centru de simetrie, în care interacțiunea spin-orbită scindează spectrul energetic al electronilor în așa mod că stările proprii ale sistemului nu răspunde la anumite proiecții ale spinului pe această axă;
3. Esențial modifică spectrul de relaxare spinică și interacțiunea de schimb dintre electroni și goluri. Acest mecanism este cunoscut sub numele autorilor Bir-Aronov-Pikus [9]. Specific experimentelor de orientare optică a purtătorilor de sarcină de neechilibru-spre exemplu electronii și deci pentru asigurarea eficiență în experiment se utilizează materiale cu concentrații mari a golurilor ca purtători de sarcină de bază. Eficiente în aceste

experimente sunt materialele cu tipul de conductivitate-p.

4. Inversia spinului poate avea loc la interacțiunea electronului liber cu electronii legați de centrele paramagnetice [10].

În această lucrare se prezintă rezultatele studierii relaxării spinice în probele de tip-p ale antimonidului de galiu dopat cu fier în limitele concentrației de până la atomare și intervalul de temperaturi  $(2 \div 77)K$ .

## II. REZULTATE EXPERIMENTALE ȘI DISCUȚIA LOR

Antimonidul de galiu dopat cu fier în concentrațiile menționate și nedopat a fost obținut prin metoda topirii zonale modificată în atmosfera de argon spectral curat. În raport de concentrația fierului introdus, concentrația golurilor se modifică pentru diapazonul  $(2 \cdot 10^{17} \div 6 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3})$ . Analiza mecanismelor de împrăștiere a purtătorilor de sarcină în raport de concentrația fierului în concentrații ce depășesc nivelul concentrațiilor defectelor proprii () duce la repartizarea neuniformă a fierului în lingouri, o parte din fier formează niște incluziuni de o structură ce esențial se deosebește de faza matricei. Aceste incluziuni de dimensiuni nanometrice sunt numite de noi-clustere. Experimental este demonstrat, că clusterelor sunt orientate de-a lungul deplasării zonei topite. Concentrația lor depinde de concentrația fierului introdus. Cu cât concentrația fierului este mai mare cu atât densitatea clusterelor este mai mare. Privitor la structura chimică a clusterelor sunt posibile mai multe variante cum ar fi:  $FeSb$ ,  $FeGa$  și alte combinații chimice între aceste componente. Analiza rezultatelor experimentale a efectului Mössbauer și experimentelor EDS și XRD au permis determinarea structurii chimice a clusterelor formate de fier, ca dopant în antimonidul de galiu, au structura  $FeGa_3$ . Rezultatele experimentelor enunțate sunt prezentate în lucrarea [11]. Dinamica spinului electronilor în antimonidul de galiu este determinată din analiza conturilor Hanle înregistrate pentru antimonidul de galiu dopat cu fier și nedopat [3,12] fotoluminescența

antimonidului de galiu dopat cu fier și cu mangan este polarizată. În experimentele discutate în această lucrare excitarea fotoluminescenței s-a folosit armonica cu lungimea de undă  $\lambda = 1,52 \mu m (815,7 \text{ meV})$  de laserul  $He - Ne$ . La această lungime de undă a excitantului fotoluminescența se excită într-un strat de la suprafața cu grosimea de  $\sim 3 \mu m$ . Densitatea fascicolului excitat nu depășește. La un așa nivel de excitare concentrația purtătorilor de sarcină de neechilibru (în cazul cercetării din această lucrare-electronii) excitate de lumină este cu cel puțin un ordin mai mică decât concentrația golurilor (purtătorii de sarcină de bază). La temperatura experimentului  $(2 \div 4,2K)$  toate stările din nivelul Fermi sunt completate cu goluri astfel efectele de autoabsorbție a fotonilor sunt puțin probabile. La aceste temperaturi sunt neglijabile și procesele de emisie luminescență secundară. Din punct de vedere fizic lumina circular polarizată excită în banda de conducție electronii cu direcție a spinului bine determinată (electronii sunt orientați). Dat fiind faptul că viteza de recombinare a electronilor nu depinde de spinul lor, evident în banda de conducție va avea loc acumularea electronilor orientați după spin. Aceasta poate avea loc deja la intensitatea excitării la care concentrația excesivă a purtătorilor de sarcină de neechilibru încă este relativ mică în comparație cu concentrația purtătorilor de sarcină de echilibru și ca rezultat procesul recombinării va fi polarizat. Pentru înregistrarea iradierii polarizate s-a folosit în experiment polarizatorul de tipul Glan  $CaCO_3$  și un compensator sub formă de film din cuarți cu grosimea  $\lambda/4$ . Placa sfert de undă  $(\lambda/4)$  între poziții așa încât axa cristalografică corespunzătoare vitezei maxime a luminii alcătuia  $(-\frac{\pi}{4}; 0; \frac{\pi}{4})$  cu planul de polarizare a polarizatorului. Lumina polarizată monocromatică trecută prin așa sistem corespundea orientărilor  $(\tau^-; \pi; \tau^+)$  respectiv. Pentru analiza polarizației fotoluminescenței s-a folosit un sistem analog (polarizator-placa) elementele căruia au fost aranjate în ordine inversă. Dacă sursa emite lumină parțial polarizată atunci în anumite poziții a analizatorului intensitatea luminii înregistrată de

receptor va primi valorile  $I_{max}$  și  $I_{min}$ . În acest caz gradul de polarizare se determină utilizând relația

$$P = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (1)$$

Instalația utilizată în experiment a fost confecționată în baza monocromatorului modernizat MDR-2 cu rețea de difracție. Radiația emisă a fost înregistrată cu ajutorul fotorezistorului din PbS de tipul FSA-24. S-au înregistrat conturile Hanle, ce reprezintă depolarizarea fotoluminescenței sub influența câmpului magnetic transversal. Gradul de polarizare depinde de concentrația fierului și de temperatură. Experimental s-a înregistrat conturile Hanle pentru fâșia de iradiere identificată ca tranziții optice cu participarea fierului ca acceptor în antimonidul de galiu.

Depolarizarea în câmpul magnetic transversal, gradul de polarizare și dependența de inducția câmpului magnetic este descrisă de relația, prezentată în lucrarea [5].

$$P(B) = P(0) \left( 1 + \Omega_L^2 T_s^2 \right)^{-1} \quad (2)$$

unde  $P(0)$  este gradul de polarizare în lipsa câmpului magnetic transversal

$P(B)$  – gradul de polarizare ca funcție de inducția câmpului magnetic transversal:

$$T_s^{-1} = \tau^{-1} + \tau_s^{-1},$$

$\tau$  – timpul de viață a purtătorilor de sarcină de neechilibru, în experimentul analizat, timpul de viață a electronilor.

$\tau_s$  – timpul de viață a purtătorilor de sarcină de neechilibru, în experimentul analizat, timpul de viață a electronilor.

$\Omega_L = \frac{g\mu_B B}{\hbar}$  este frecvența Larmor

$g$  – factor;  $B$  – inducția câmpului magnetic;

$\mu_B$  – magnetonul Bhor.

Pentru gradul de polarizare circulară este cunoscut relația:

$$P = P_0 \left( 1 + \frac{\tau}{\tau_0} \right)^{-1}, \quad (3)$$

unde  $P(0)$  – este valoarea maximală a gradului de polarizare în lipsa relaxării spinice determinată de regulile de selecție pentru tranzițiile bandă-bandă  $\Gamma_4 \rightarrow \Gamma_6$ , pentru structura cunoscută a antimonidului de galiu  $P_0 = 0,25$ .

Din relațiile (2) și (3) rezultă, că măsurând gradul de polarizare a

fotoluminescenței  $P$  și dependența lui de inducția câmpului magnetic transversal s-a determinat în mod independent timpul de viață ( $\tau$ ) și timpul de relaxare spinică a electronilor. În aceste experimente  $T_s$  se determină după valoarea inducției câmpului magnetic  $B_{1/2}$ , ce

$$P(B_{1/2}) = \frac{1}{2} P(0)$$

corespunde  $P(B_{1/2}) = \frac{1}{2} P(0)$  Pentru ( $\tau$ ) și ( $\tau_s$ ) în baza experimentului ne folosim de relațiile:

$$\tau_s = \frac{P_0}{P_0 - P(0)} \frac{\hbar}{g\mu_B B_{1/2}}, \quad (4)$$

$$\tau = \frac{P_0}{P_0 - P(0)} \frac{\hbar}{g\mu_B B_{1/2}} \quad (5)$$

Sau înregistrat conturile Hanle pentru diferite probe de antimonid de galiu dopat cu fier în diferite concentrații la temperatura de  $4,2K$ . Conturilele Hanle pentru diferite probe de antimonid de galiu dopat cu fier în diferite concentrații la temperatura  $4,2K$  în forma:

$$\frac{P(0)}{P(B)} - 1 = f(B^2)$$

sunt prezentate în Figura 1. Punctele sunt datele experimentale, linie pline sunt conturile calculate, factor variațional în calcule a fost  $g$  – factor. O corelare suficientă s-a obținut pentru  $g = 9,3$ . Această valoare este cunoscută în literatura de specialitate [6]. Rezultatele experimentale prezentate în Figura 1 confirmă că cu majorarea concentrației dopantului în matricea de bază se micșorează unghiul de înclinare a conturilor Hanle față de axa orizontală a câmpului magnetic transversal. Având din experiment  $P(0)$  și  $B_{1/2}$  pentru  $P(B) = \frac{1}{2} P(0)$  folosind relațiile (4) și (5) am calculat timpul de viață a purtătorilor de sarcină de neechilibru (electroni) și timpul relaxării spinice ( $\tau_s$ ) a acestor purtători. Rezultatele obținute sunt prezentate în Tabelul 1.

Din Tabel conchidem, la general, timpul de viață a purtătorilor de sarcină se micșorează cu creșterea concentrației ( $N_A - N_D$ ), și anume ( $N_A - N_D$ ) variază în experiment pentru diapazonul  $(1,45 \cdot 10^{17} \div 2,32 \cdot 10^{19}) \text{ cm}^{-3}$ , timpul de viață variază de la  $(7,37 \cdot 10^{-9} \div 2,1 \cdot 10^{-10}) \text{ s}$ . Pentru același interval de concentrații timpul relaxării spinice se schimbă în intervalul

$(3,47 \cdot 10^{-9} \div 1,41 \cdot 10^{-9})$  s raportul  $(\tau_s/\tau_p)$  crește de la 0,47 până la 6,67 .

În ultima coloniță a acestui tabel sunt prezentate calculele teoretice pentru timpul de relaxare spinică în cadrul modelului teoretic Bir-Aronov-Pikus cu parametrii structurii a

antimonidului de galiu din lucrarea [5]. Comparând conchidem, pentru antimonidul de galiu nedopat și dopat cu fier în concentrații mici, până aproximativ 0,1%, relaxarea spinică este descrisă de modelul teoretic Bir-Aronov-Pikus.

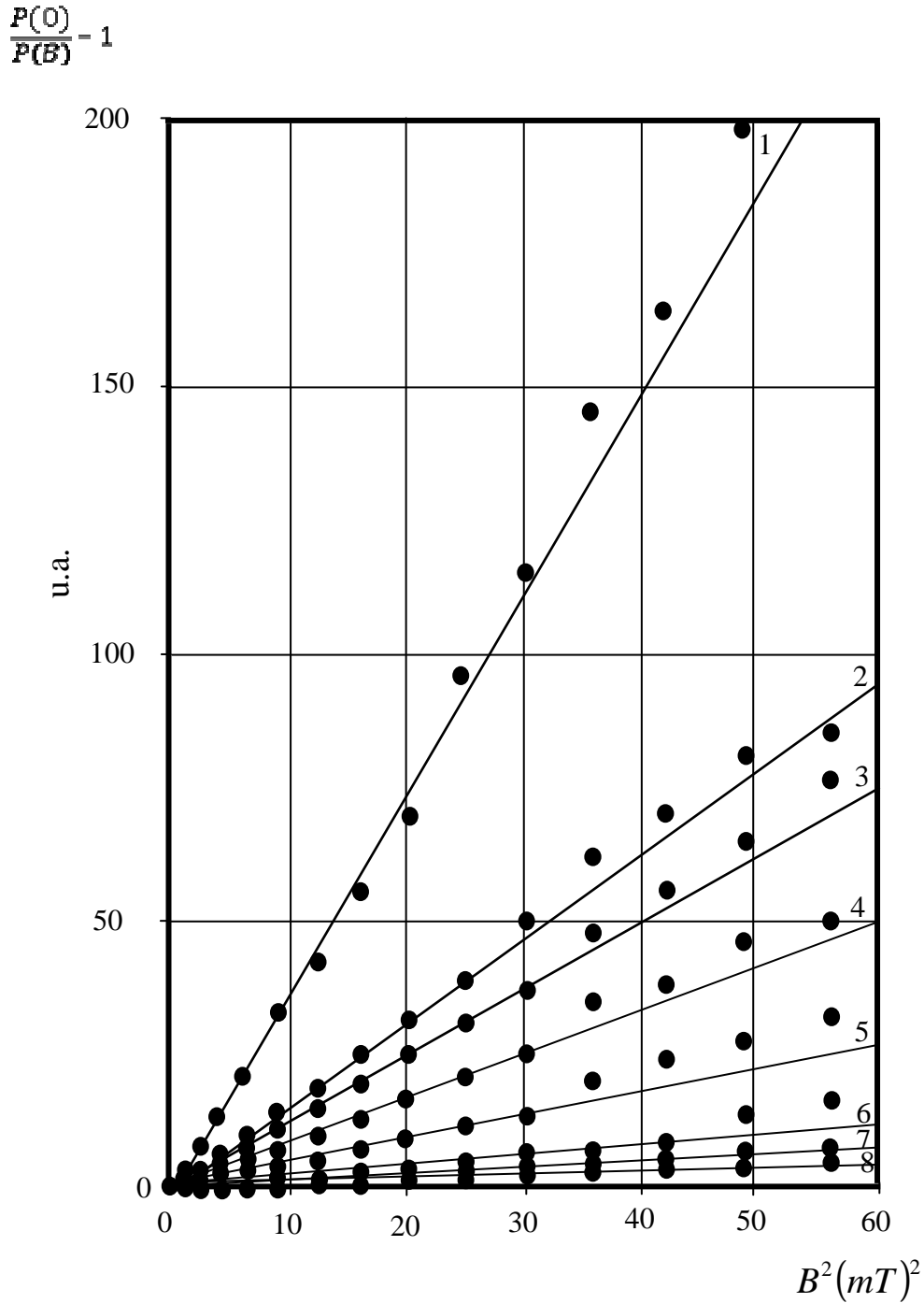


Fig. 1 Contururile Hanle pentru  $GaSb\langle Fe \rangle$  la  $T = 2K$  (puncte - experiment, linii continui - calculate după formula (5));

№	Conținutul fierului	$N_A - N_D$ $T=80K$	$\tau_p$	$\tau_s$	$\frac{\tau_s}{\tau_p}$	$N_t = (\beta\tau_p)^{-1}$	$\tau_s$ teoretic
---	---------------------	------------------------	----------	----------	-------------------------	----------------------------	----------------------

1. **GaSb<Fe> 0,000%**
2. **GaSb<Fe> 0,001%**
3. **GaSb<Fe> 0,010%**
4. **GaSb<Fe> 0,100%**
5. **GaSb<Fe> 0,300%**
6. **GaSb<Fe> 1,000%**
7. **GaSb<Fe> 2,000%**
8. **GaSb<Fe> 3,000%**

	în %	$cm^{-3}$	s	s		$cm^{-3}$	s
1	0,000	$1,45 \cdot 10^{17}$	$7,37 \cdot 10^{-9}$	$3,47 \cdot 10^{-9}$	0,47	$1,51 \cdot 10^{17}$	$4,3 \cdot 10^{-9}$
2	0,001	$1,72 \cdot 10^{17}$	$3,91 \cdot 10^{-9}$	$2,52 \cdot 10^{-9}$	0,64	$2,7 \cdot 10^{17}$	$4,2 \cdot 10^{-9}$
3	0,010	$2,5 \cdot 10^{17}$	$2,53 \cdot 10^{-9}$	$1,99 \cdot 10^{-9}$	0,79	$4,1 \cdot 10^{17}$	$3,12 \cdot 10^{-9}$
4	0,100	$4,2 \cdot 10^{17}$	$1,7 \cdot 10^{-9}$	$1,57 \cdot 10^{-9}$	0,92	$6,4 \cdot 10^{17}$	$2,11 \cdot 10^{-9}$
5	0,300	$6,31 \cdot 10^{17}$	$1,52 \cdot 10^{-9}$	$1,6 \cdot 10^{-9}$	1,06	$7,3 \cdot 10^{17}$	$1,7 \cdot 10^{-9}$
6	1,000	$3,62 \cdot 10^{18}$	$9,52 \cdot 10^{-10}$	$1,21 \cdot 10^{-9}$	1,27	$1,2 \cdot 10^{18}$	$1,9 \cdot 10^{-10}$
7	2,000	$4,35 \cdot 10^{18}$	$6,60 \cdot 10^{-10}$	$1,17 \cdot 10^{-9}$	1,78	$1,6 \cdot 10^{18}$	$1,9 \cdot 10^{-10}$
8	3,000	$1,52 \cdot 10^{19}$	$4,03 \cdot 10^{-10}$	$1,61 \cdot 10^{-9}$	4,00	$2,75 \cdot 10^{18}$	$5,5 \cdot 10^{-11}$

Табелул 1. Concentrația centrelor de recombinăție în cristalele *GaSb* dopate cu *Fe*.

În concentrații a fierului mai mari ca 0,1% acest model nu explică procesele de relaxare spinică, raportul  $\left(\tau_s^{exp} / \tau_s^{teor}\right)$  se schimbă în intervalul (0,80 ÷ 0,76). Se poate de presupus că în acest caz în relaxarea spinică își aduc

### III. CONCLUZII

În lucrarea dată se analizează influența fierului asupra mecanismelor de relaxare spinică în antimonidul de galiu dopat cu fier 3% at.

în concentrații de până la Se demonstrează că pentru concentrații mici a dopantului rezultatele experimentale se descriu în cadrul modelului teoretic Bir-

Aronov-Pikus, pentru concentrații mari a fierului rezultatele experimentale nu se încadrează în modelul menționat. Se presupune că divergența dintre rezultatele experimentale și teoretice sunt determinate de sistemul de clusteri format de dopant de structura *FeGa<sub>3</sub>*.

### IV. BIBLIOGRAFIE

- [1] Курсаев Ю. Г., Спинтроника, Успехи Физических Наук, т. 180, в. 7, 180, 2010, с. 760
- [2] Джиоев Р.И., Аксянов И.Г., Лазарев М.В., Нинуа О.А. Исследование эффекта Ханле по поперечной компоненте спиновой ориентации электронов в полупроводниках A<sup>III</sup>B<sup>V</sup>. Физика Твёрдого Тела, 2006, 48, с. 2146
- [3] Круковская Л. П, Миронов И. Ф, Чебан В. Н. ФТП, 1978, т. 12, с. 689

aportul clusterelor ce se formează în cazul dopării antimonidului de galiu dopat cu fier. Prin aceasta se explică și cu concentrația centrelor de recombinare  $N_T$ , calculată utilizând relația  $N_T = (\beta \tau_p)^{-1}$  unde  $\beta$  – este constanta de recombinare luată cu valoarea  $9 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$  în conformitate cu lucrarea [6].

- [4] Сафаров В. И., Мишков А. Н., Ермакова Н. Г., Колева Э. М., Миронов И. Ф., Чайкина Е. И. Физика Твёрдого Тела, 1977, т.23, в.11, с. 3339
- [5] Аронов А. Г., Пикус Г. Е., Титков А. Н. Спиновая релаксация электронов проводимости в соединениях A<sub>3</sub>B<sub>5</sub> р-типа. ЖЭТФ. 1983. т. 84. в. 3. с. 1170-1184
- [6] Георгицэ Е. И., Гуцуляк Л. М., Иванов-Омский В. И., Погорлецкий В. М., Титков А. Н. Мелкий акцепторный уровень марганца в антимиониде галия. Письма в ЖТФ, 1991, т.17, в.17, с.21
- [7] R. Elliott, Physical Review 96, 266, 1954.
- [8] Дьяков М. И., Перель В. И. ФТТ, 1971, т. 23, в. 13 с. 3581
- [9] Бир Г. Л., Аронов А. Г., Пикус Г. В. ЖЭТФ, 1975, т. 69, с. 1382
- [10] Глазов М. М., Ивченко Е. Л. Влияние электрон–электронного взаимодействия на спиновую релаксацию носителей тока в полупроводниках. ЖЭТФ, 2004, т. 126, с. 1465-1478
- [11] Turtă C., Teodorescu V. S., Mihălache A., Mereacre V., Gheorghită E., Volodina G. F., Filoti G. Microscopy and Mossbauer Studies of Iron States in Doped Galium Antimonide. n: Moldavian Journal of the Physical Sciences, 2014, nr 1, p. 23
- [12] Georigitse E. I. et. al. Soviet Phys Semiconductors, 1991, 25, p. 1180