

Г.П. Гайдар

## Магніто- і тензоопір компенсованих кристалів р-Ge в області слабких, проміжних і класично сильних магнітних полів

Інститут ядерних досліджень НАН України, пр. Науки, 47, Київ, 03680, Україна. e-mail: [gaydar@kinr.kiev.ua](mailto:gaydar@kinr.kiev.ua)

На кристалах компенсованого р-Ge (з коефіцієнтом компенсації  $k = N_{\text{Sb}}/N_{\text{Ga}} = 0,5$ ) при температурі 77 К проведено виміри поперечного ( $H \perp (J // X)$ ) магнітотензоопору (в інтервалі магнітних полів  $0 < H \leq 22,3$  кЕ) при фіксованих значеннях механічних напружень  $X_i = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,9; 1,1; 1,5$  ГПа, що задавали пружну деформацію вздовж зразків, кристалографічна орієнтація яких співпадала з напрямком [100]. Також при фіксованих напруженостях магнітного поля, що відповідали значенням

$$H_i = 2; 4; 8; 10; 15; 20; 22,3 \text{ кЕ, були виміряні залежності питомого опору } \left. \frac{\Delta r_X^H}{r_0} \right|_{H_i = \text{const}} = f(X)$$

від механічного напруження  $X$ , що співпадало з поздовжньою віссю кристала ( $X // J // [100]$ ) і змінювалося в межах  $0 \leq X \leq 1,5$  ГПа. Останні залежності характеризувалися наявністю мінімуму в області  $0,5 \div 0,6$  ГПа при мінімальних напруженостях  $H = 2$  кЕ, який зміщувався по шкалі  $X$  до значень  $0,2 \div 0,3$  ГПа при підвищенні  $H$  до 22,3 кЕ.

**Ключові слова:** германій, компенсовані кристали, магнітотензоопір, тензомагнітоопір.

Стаття постуила до редакції 15.07.2015; прийнята до друку 15.12.2015.

### Вступ

Відомо [1], що в Ge і Si n-типу одновісна пружна деформація знімає виродження еквівалентних мінімумів по енергії. Міжмінімумний перерозподіл електронів, який виникає при цьому, зумовлює зміни питомого опору, оскільки рухливість носіїв заряду в ізоенергетичних еліпсоїдах цих кристалів різко анізотропна.

Якщо на досліджувані кристали одночасно впливає і одновісна пружна деформація  $X$ , і магнітне

поле  $H$ , то величину  $\left. \frac{\Delta r_X^H}{r_0} \right|_H \equiv \frac{r_X^H - r_0^H}{r_0^H}$ , яка

характеризує зміну питомого опору в залежності від деформуючого зусилля  $X$  при сталому магнітному полі ( $H = \text{const}$ ), називають *тензомагнітоопором* (для спрощення у даній роботі називатимемо

тензоопором). Величину  $\left. \frac{\Delta r_H}{r_0} \right|_X \equiv \frac{r_X^H - r_X^0}{r_X^0}$ , яка

характеризує зміну питомого опору в залежності від

напруженості магнітного поля  $H$  при сталій величині деформуючого зусилля ( $X = \text{const}$ ), називають *магнітотензоопором* (або магнітоопором).

При розміщенні векторів струму  $J$  і напруженості магнітного поля  $H$  паралельно головній осі ізоенергетичного еліпсоїда зміна питомого опору одноеліпсоїдного напівпровідника в поздовжньому (неквантуючому) магнітному полі  $\Delta r_H^{//} / r_0$  (подібно до випадку сферично-симетричних ізоенергетичних поверхонь) має бути тотожно рівною нулю [2]. Тому з ростом  $X$  при  $X // J // H // [111]$  в кристалах n-Ge по мірі наближення до умов повного переселення носіїв заряду із трьох мінімумів, що піднімаються вгору по шкалі енергій, в один еліпсоїд, що опускається (і орієнтований своєю головною віссю вздовж  $X$ ),

поздовжній магнітотензоопір  $\left. \frac{\Delta r_H^{//}}{r_0} \right|_X$  повинен

зменшуватись і при виході тензоопору на насичення прямувати до нуля, що і було доведено експериментально [3]. Було показано також, що при

дуже великих стискуючих напруженнях  $X$  магнітне поле  $H$ , орієнтоване вздовж  $X // [111]$ , питомого опору кристала не змінювало ( $r_{X(\infty)}^H \equiv r_{X(\infty)}^0$ ).

Суттєве зростання (майже 30-кратне) магнітоопору в поперечному магнітному полі, а також істотна залежність коефіцієнта Холла в p-Ge від  $H$ , пов'язані, як було вперше показано Віллардсоном та ін. в [4], з наявністю двох сортів носіїв заряду в кристалах і впливом легких дірок на ці ефекти. Ситуація, близька до згаданої, може виникати також і за інших умов, які забезпечують (наприклад, за рахунок одновісної пружної деформації) певне розділення носіїв заряду одного знаку в багатодолинних напівпровідниках на окремі групи. Найбільш важливою відмінністю цього випадку від згаданих особливостей недеформованого p-Ge є те, що ступінь розділення носіїв на групи в цьому випадку не постійний, а залежить від рівня деформації. Крім того, у випадку p-Ge відступ від ізотропності ефективних мас як легких, так і важких дірок відносно невеликий, тоді як в n-Ge ефективні маси кожної з груп, на які поділяються носії при деформації, характеризуються сильно вираженою анізотропією. Саме ці особливості й повинні приводити не просто до кількісних змін відповідних характеристик, але й якісно змінювати та ускладнювати відповідні залежності.

Ефект магнітотензоопору в n-Ge при  $X // J // [111]$  і  $H // [1\bar{1}0]$  за умов переважно фононного розсіяння детально вивчався в [5]. Як випливає з цієї роботи, фізично найбільш цікавим є випадок помірних механічних напружень  $X$ , при яких характерною є наявність двох сортів носіїв заряду: електронів з малою рухливістю  $m_{\parallel}$  (в еліпсоїді, що

орієнтований великою віссю вздовж деформуючої напруги  $X // J // [111]$ ) та електронів з набагато вищими значеннями  $m$  (в еліпсоїдах, орієнтованих під кутом до  $X // J$ ). При вимірах магнітотензоопору в поперечному магнітному полі це може приводити до появи максимумів на залежностях

$$\left. \frac{\Delta r_H^{\perp}}{r_0} \right|_X \equiv \frac{r_X^{H \perp J} - r_X^0}{r_X^0} = \frac{r_X^{H \perp J}}{r_X^0} - 1 = f(H) \text{ та до}$$

інших особливостей. Результати теоретичних розрахунків, проведених із використанням формул теорії анізотропного розсіяння, та дослідні дані показали, що при монотонному зменшенні ефективної рухливості носіїв заряду (яке зумовлювало монотонний ріст  $r = r(X)$  аж до виходу на насичення) магнітотензоопір, що вимірюється при різних значеннях  $H = const$ , з ростом  $X$  змінюється не монотонно, а проходить через максимум. Цією ж особливістю магнітотензоопору в багатодолинному напівпровіднику з двома сортами носіїв заряду визначається і відносне розташування полевих залежностей поперечного магнітоопору в деформованому n-Ge при  $X // J // [111]$  і  $H // [110]$ . Специфіка прояву різносортних носіїв заряду одного знаку (в помірно деформованих уздовж певних напрямків багатодолинних напівпровідниках) може

виявитися ще більш рельєфно вираженою в дослідах із гарячими носіями внаслідок різного їх розігріву в електричному полі заданої напруженості, що потрібно враховувати при детальному аналізі експериментальних даних.

Після проведеного аналізу ефектів поздовжнього  $\left. \frac{\Delta r_H^{\parallel}}{r_0} \right|_X$  і поперечного  $\left. \frac{\Delta r_H^{\perp}}{r_0} \right|_X$  магнітотензоопору, розглянемо ефект поздовжнього тензомагнітоопору

$$\text{на кристалах n-Ge} \quad \left. \frac{\Delta r_X^{\parallel}}{r_0} \right|_H \equiv \frac{r_X^H - r_0^H}{r_0^H} = f(X),$$

досліджений в роботі [3] при фіксованих значеннях напруженості магнітного поля  $H = 0; 12,5; 50; 100$  кЕ і температурі  $T = 77$  К у залежності від механічного напруження  $X$ . Виявилось, що одержані криві для тензомагнітоопору, який вимірюється при різних значеннях  $H = const$ , найбільш сильно розрізняються в області максимальних значень механічних напружень  $X$ .

Особливої уваги заслуговує тензомагнітоопір, що вимірюється на зразках n-Ge при досить великих  $X$  і  $H$ , тобто таких, під впливом яких (при їх незалежному використанні) значення  $r(X)$  або  $r(H)$  могли б бути виведені на насичення. Дійсно, за такої умови при  $H // X // J // [111]$  маємо

$$\left. \frac{\Delta r_X^{\parallel}}{r_0} \right|_H \equiv \frac{r_X^H - r_0^H}{r_0^H} \Big|_{X \rightarrow \infty}^{H \rightarrow \infty} = \frac{r_{X(\infty)}^{H(\infty)}}{r_0^{H(\infty)}} - 1 = \frac{r_{X(\infty)}^0}{r_0^{H(\infty)}} - 1, \quad (1)$$

оскільки, згідно з [3],  $r_{X(\infty)}^{H(\infty)} = r_{X(\infty)}^0$ .

Співвідношення (1) показує, що величина тензомагнітоопору, який вимірюється вздовж [111] в n-Ge при одночасній дії сильних  $H$  і  $X$ , може бути знайдена шляхом використання двох більш простих операцій, а саме: за тензоопором  $r_{X(\infty)}^0$ , що вимірюється при великих  $X$  (але за відсутності  $H$ ), з наступним використанням магнітоопору  $r_0^{H(\infty)}$ , одержаному на тому ж зразку при сильних  $H$ , але за відсутності механічного навантаження  $X$ .

Цими спрощеннями, однак, одержання інформації щодо ефекту тензомагнітоопору при великих  $X$  і  $H$  не обмежується. Виконавши певні математичні перетворення [2], отримаємо співвідношення

$$\frac{r_{X(\infty)}^0}{r_0^{H(\infty)}} = \frac{7K + 2}{K + 8}, \quad (2)$$

де  $K$  – параметр анізотропії рухливості носіїв заряду в окремо взятому ізоенергетичному еліпсоїді, який визначається наступним чином [2]:

$$K = \frac{m_{\perp}}{m_{\parallel}} = \frac{3}{2} \frac{r_{X(\infty)}^0}{r_0^0} - \frac{1}{2}, \quad (3)$$

Співвідношення (2) показує, що інформація про

тензомагнітоопір в умовах гранично великих  $H$  і  $X$  (1) може бути отримана взагалі за відсутності магнітного поля, із одних лише вимірів тензоопору в широкому інтервалі  $X$ , оскільки значення  $K$ , якими визначається права частина виразу (2), можуть бути знайдені з цих даних за допомогою співвідношення (3).

В області гелієвих температур магніто- і тензоопір некомпенсованих і компенсованих кристалів Ge n- і p-типу досліджено в роботах [6, 7]. Мета даної роботи – вивчення магніто- і тензоопору в компенсованих кристалах германію р-типу в області комбінованого механізму розсіяння носіїв заряду (на іонізованих домішках і на коливаннях кристалічної ґратки), тобто в області помірно низьких температур (~ 77 К).

## I. Результати і обговорення

У дослідах були використані зразки р-Ge зі ступенем компенсації  $k = N_d/N_a = N_{Sb}/N_{Ga} = 0,5$ , що мали питомий опір при кімнатній температурі  $r_{300K} \approx 1,57$  Ом·см і вирізалися в напрямку осі вирощування зливка з поздовжньою орієнтацією [100]. Досліджувані зразки, геометрія яких вибиралася у вигляді паралелепіпедів з розмірами  $10 \times 1,5 \times 1,5$  мм<sup>3</sup>, проходили необхідну попередню обробку (шліфовка, поліровка і травлення в СР-4).

При типових лабораторних значеннях напруженості магнітного поля  $0 < H \leq 22,3$  кЕ для забезпечення виконання критерію  $\frac{mH}{c} \approx 1$ , що відповідає значенням проміжних магнітних полів, досліди з вищезгаданими кристалами проводилися

при  $T = 77$  К як при різних значеннях  $X_i = const$  ( $X = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,9; 1,1; 1,5$  ГПа) у залежності від напруженості магнітного поля  $H$  (рис. 1), так і при різних фіксованих значеннях  $H_i = const$  ( $H = 2; 4; 8; 10; 15; 20; 22,3$  кЕ) у залежності від механічного напруження  $X$  у межах  $0 \leq X \leq 1,5$  ГПа (рис. 2).

З рис. 1 видно, що підвищення  $H$  при  $X_i = const$  приводить до зростання магнітоопору

$$\left. \frac{\Delta r_X^{H \perp J}}{r_0} \right|_X = \frac{r_X^H - r_X^0}{r_X^0} = f(H) \quad \text{компенсованих}$$

кристалів р-Ge, однак при монотонному підвищенні механічних напружень  $X_i$  має місце немонотонність у розміщенні відповідних кривих магнітоопору.

Підвищення  $X$  при  $H_i = const$  (рис. 2) приводить

$$\text{до зростання тензоопору } \left. \frac{\Delta r_X^{H \perp J}}{r_0} \right|_H = \frac{r_X^H - r_0^H}{r_0^H} \quad 3$$

наявністю характерного мінімуму, який найбільш чітко проявляється на залежностях

$$\left. \frac{\Delta r_X^{H \perp J}}{r_0} \right|_{H_i=const} = f(X) \quad \text{в області } \frac{mH}{c} \approx 1. \quad \text{Як}$$

видно з рис. 2, деформаційні зміни в зонній структурі компенсованого р-Ge, що відбуваються при менших значеннях механічних напружень  $X$ , проявляють себе

$$\text{при вимірах тензоопору } \left. \frac{\Delta r_X^{H \perp J}}{r_0} \right|_{H_i=const} = f(X)$$

в магнітних полях більш високої напруженості. Тобто, зсув мінімуму цих функцій в область менших

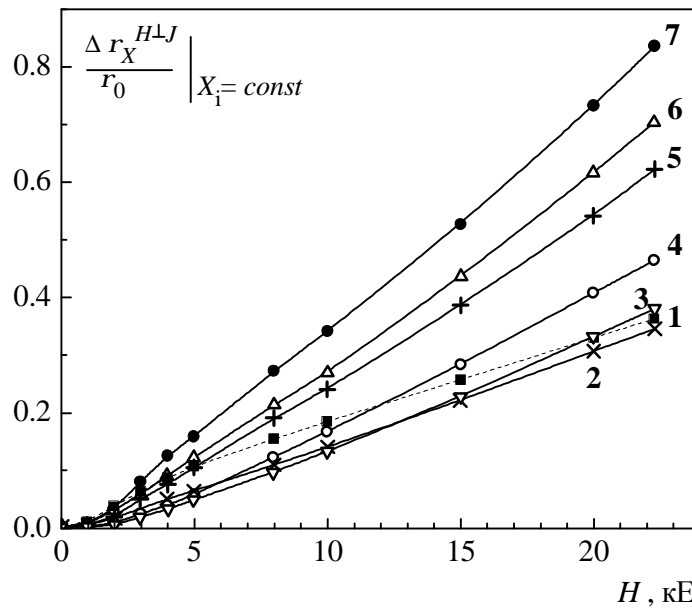
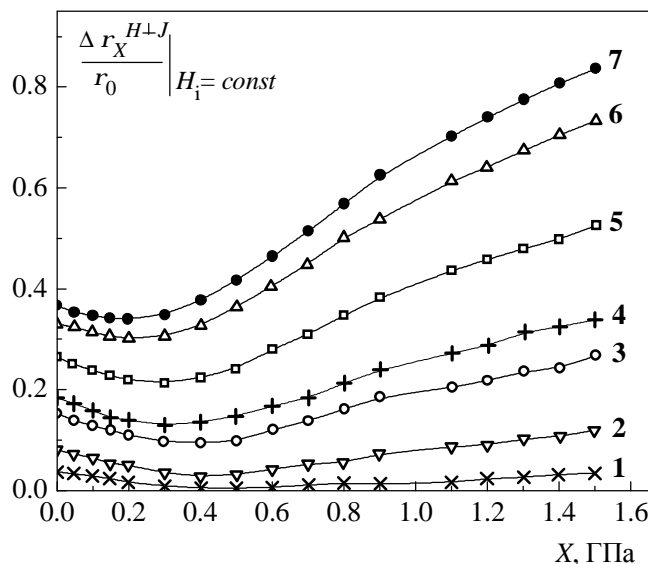
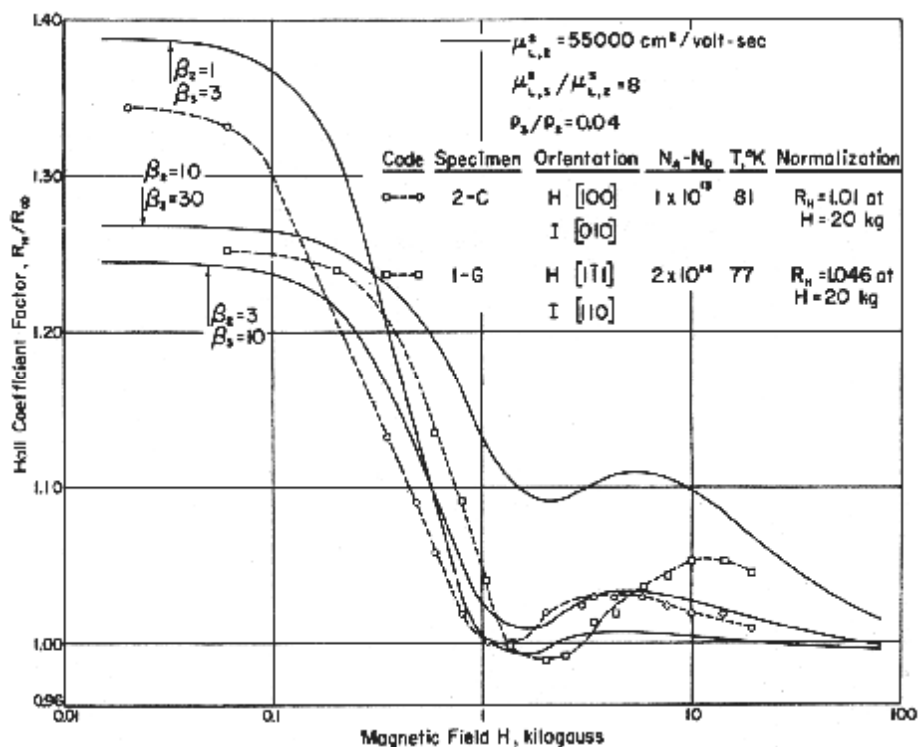


Fig. 1. The Field dependence (within the magnetic field  $0 < H \leq 22.3$  кЕ) of transverse magneto resistance in compensated crystal p-Ge (measured at  $T = 77$  К) for different values of mechanical load  $X_i$ , that elastically deform crystals and directed along the crystallographic direction [100] 1 (■) - 0; 2 (×) - 0.2; 3 (∇) - 0.4; 4 (○) - 0.6; 5 (+) - 0.9; 6 (Δ) - 1.1; 7 (●) - 1.5 GPa.



**Fig. 2.** Dependence of cross-Tenno magnetoresistance (measured at  $T = 77$  K) within  $0 \leq X \leq 1.5$  GPa under the conditions of  $X // J // [100]$  at different magnetic fields  $H_i$ , oriented perpendicular to the longitudinal axis of crystals: 1 (x) - 2; 2 (v) - 4; 3 (o) - 8; 4 (+) - 10; 5 (square) - 15; 6 (triangle) - 20; 7 (circle) - 22.3 kE.



**Fig. 3.** Comparison of the theoretically calculated Hall coefficient (solid curves) and experimental data for germanium (dashed curves), measured at the temperature of liquid nitrogen (Picture borrowed from [8]).

значень  $X$  ( $\sim 0,3$  ГПа) супроводжується підвищенням значень напруженості магнітного поля (до  $H \approx 22,3$  кЕ) і, навпаки, при менших значеннях  $H$  ( $H \approx 2$  кЕ) він виявляється зміщеним в область більш високих механічних напружень  $X$  ( $\sim 0,5 \div 0,6$  ГПа). Дуже ймовірно, що поява мінімуму на кривих рис. 2 пов'язана з наявністю в кристалах р-Ge важких і легких дірок, подібно до того, як наявність цих двох сортів дірок зумовлює немонотонності полевих залежностей коефіцієнта Холла в кристалах р-типу (рис. 3, [8]).

Таким чином, можна стверджувати, що при формуванні і вимірах магнітоопору на компенсованих і одночасно деформованих монокристалах р-Ge одночасно пружна деформація і напруженість магнітного поля є взаємодоповнюючими факторами впливу, які не вносять (в межах пружної деформації) залишкових змін у будову і властивості досліджуваних кристалів. Адже виміри питомого опору і коефіцієнта Холла при кімнатній температурі і температурі рідкого азоту, які проводилися після зняття механічних

напружень із досліджуваних кристалів, помітних змін цих параметрів (у результаті інтенсивного механічного навантаження до 1,5 ГПа) не виявляли. Концентрація дислокацій в кристалах після вказаних механічних навантажень теж залишалася незмінною ( $\sim 10^2 \div 10^3 \text{ см}^{-2}$ ).

Що ж стосується загального вигляду залежностей  $\frac{\Delta r_X^{H \perp J}}{r_0} = f(H)$  (рис. 3), то такі криві у випадку

компенсованих кристалів, як і в дослідах з некомпенсованими зразками із загальною концентрацією електрично-активних домішок  $\sim (4 \div 5) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  навіть при напруженнях магнітних полів  $\sim 50 \div 200 \text{ кЕ}$  не проявляють (ні при 300 К, ні при 77 К) тенденції до насичення [2, 9]. Ця особливість пов'язується з високою чутливістю тензомагнітоопору до залишкових неоднорідностей у просторовому розподілі легуючих домішок і наявністю статистично нерівномірно розподілених в об'ємі кристалів неоднорідностей херрінгівського типу.

## Висновки

1. Встановлено, що магнітотензоопір компенсованих кристалів р-Ge, що вимірюється в області слабких, проміжних і класично сильних  $H$ , проявляє немонотонність змін при монотонному підвищенні механічних напружень  $X_i$  одночасно пружно деформованих кристалів.

2. Виявлено, що залежності змін тензомагнітоопору при монотонному зростанні  $X$  характеризуються наявністю мінімуму

$$\left. \frac{\Delta r_X^H}{r_0} \right|_{H_i = \text{const}} = f(X), \text{ який при малих значеннях}$$

$H = 2 \text{ кЕ}$  розміщується в області  $X \sim 0,5 \div 0,6 \text{ ГПа}$ , а при підвищенні  $H$  до 22,3 кЕ зміщується в область значень  $X \sim 0,2 \div 0,3 \text{ ГПа}$ . Припускається, що цей ефект обумовлений наявністю в кристалах р-Ge двох сортів носіїв заряду – важких і легких дірок.

- [1] P.I. Barans'kij, A.V. Fedosov, G.P. Gajdar, Fizichni vlastivosti kristaliv kremniju ta germaniju v poljah efektyvnogo zovnishn'ogo vplivu (Nadstir'ja, Luc'k, 2000).
- [2] P.I. Baranskij, I.S. Buda, I.V. Dahovskij, V.V. Kolomoec, Jelektricheskie i gal'vanomagnitnye javlenija v anizotropnyh poluprovodnikah (pod red. P.I. Baranskogo) (Naukova dumka, Kiev, 1977).
- [3] P.I. Baranskij, V.V. Kolomoets, Phys. stat. sol. (b) 42(2), K113(1970).
- [4] R.K. Willardson, T.C. Harman, A.C. Beer, Phys. Rev. 96(6), 1512(1954).
- [5] P.I. Baranskij, V.V. Bajdakov, I.V. Dahovskij, A.I. Elizarov, FTP 9(8), 1613(1975).
- [6] K. Sugiyama, A. Kobayashi, J. Phys. Soc. Jpn. 18(2), 163(1963).
- [7] K. Sugiyama, J. Phys. Soc. Jpn. 18(10), 1555(1963).
- [8] A.C. Beer, Galvanomagnetic Effects in Semiconductors. Eds. F. Seitz and D. Turnbull. – Supplement 4, Solid State Physics (Academic Press Inc., New York and London, 1963).
- [9] P.I. Barans'kij, A.V. Fedosov, G.P. Gajdar, Neodnorodnosti napivprovodnikiv i aktual'ni zadachi mizhdefektnoi vzaemodii v radiacijnij fizici i nanotehnologii. Monografija (Redakcijno-vidavnicnij viddil Luc'kogo derzhavnogo tehnicnogo universitetu, Kiiv Luc'k, 2007).

G.P. Gaidar

## Magneto- and Tensoresistance of the p-Ge Compensated Crystals in the Range of Weak, Intermediate and Classically Strong Magnetic Fields

*Institute for Nuclear Research, NAS of Ukraine, Avenue Nauku, 47, Kyiv, 03680, Ukraine,  
e-mail: gajdar@kinr.kiev.ua*

On the crystals of compensated p-Ge (with the compensation factor of  $k = N_{\text{Sb}}/N_{\text{Ga}} = 0.5$ ) the transverse ( $H \perp (J // X)$ ) magnetoresistance (within the magnetic fields of  $0 < H \leq 22.3 \text{ kOe}$ ) at fixed values of the mechanical stresses  $X_i = 0; 0.2; 0.4; 0.6; 0.9; 1.1; 1.5 \text{ GPa}$  were measured at 77 K. These mechanical stresses  $X$  created the elastic deformation along the samples, the crystallographic orientation of which coincided with the direction of [100]. Also at fixed magnetic field intensities  $H_i = 2; 4; 8; 10; 15; 20; 22.3 \text{ kOe}$  the dependencies of

resistivity  $\left. \frac{\Delta r_X^{H \perp J}}{r_0} \right|_{H_i = \text{const}} = f(X)$  on the mechanical stress  $X$ , which coincides with the longitudinal

axis of the crystal ( $X // J // [100]$ ) and changes in the range of  $0 \leq X \leq 1.5 \text{ GPa}$ , were measured. Last dependences characterized by the presence of a minimum in the range of  $X \sim 0.5 \div 0.6 \text{ GPa}$  at the minimal magnetic field intensities  $H = 2 \text{ kOe}$ , which was shifted to the values of  $X \sim 0.2 \div 0.3 \text{ GPa}$  with increasing  $H$  up to 22.3 kOe.

**Keywords:** germanium, compensated crystals, magnetotensoresistance, tensomagnetoiresistance.