

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОННИХ ПРОЦЕСІВ

УДК 537.311.33

А.О. Дружинін¹, І.Й. Мар'ямова², І.В. Павловський², Ю.М. Ховерко²

¹Національний університет "Львівська політехніка",

²Науково-дослідний центр "Кристал",

Лабораторія сенсорної електроніки та лазерної технології

ОСЦИЛЯЦІЇ МАГНІТООПОРУ НИТКОПОДІБНИХ КРИСТАЛІВ ГЕРМАНІЮ ПРИ КРІОГЕННИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

© Дружинін А.О., Мар'ямова І.Й., Павловський І.В., Ховерко Ю.М., 2005

A.A. Druzhinin, I.I. Maryamova, I.V. Pavlovskyy, Yu.M. Khoverko

MAGNETORESISTANCE OSCILLATION IN GE WHISKERS AT CRYOGENIC TEMPERATURE

© Druzhinin A.A., Maryamova I.I., Pavlovskyy I.V., Khoverko Yu.M., 2005

Виявлено та експериментально досліджено магнітофононні осциляції поперечного і поздовжнього магнітоопору в сильно легованих ниткоподібних кристалах (НК) Ge n- і p-типу провідності в інтервалі температур 4,2–70 К в магнітних полях з індукцією до 14 Тл. Досліджено вплив одновісної деформації та розігріву газу носіїв заряду на характер магнітофононних осциляцій магнітоопору. Розраховано ефективні маси електронів та легких дірок на основі експериментальних даних дослідження поперечного магнітоопору.

Magnetophonone oscillations of transversal and longitudinal magnetoresistance in heavily doped n- and p-type Ge whiskers in the temperatures range 4,2–70 K in magnetic fields up to 14 T were observed and experimentally studied. The effect of the uniaxial strain on the magnetophonone oscillations of magnetoresistance was studied as well as the effect of charge carriers heating. On the basis of transversal magnetoresistance experimental data the effective masses of electrons and light holes were calculated.

Вступ

Сильне магнітне поле є одним з найважливіших інструментів для вивчення енергетичного спектра носіїв заряду в твердому тілі, а дослідження гальваномагнітних ефектів у твердих тілах також дають інформацію про домінуючий характер розсіювання носіїв заряду. Як відомо, в магнітному полі спостерігається квантування енергії електрона, внаслідок чого енергетичний спектр ділиться на N підзон Ландау. Магнітне поле збирає стани, рівномірно розподілені по зоні, у дискретні підзони. І саме немонотонна залежність густини станів є основною причиною осциляцій різних термодинамічних величин (осциляції де Гааза-ван Альфена) і кінетичних коефіцієнтів (осциляції Шубнікова-де Гааза), що спостерігались в металах і напівпровідниках з виродженим електронним газом за низьких температур [1]. Ще одним важливим наслідком квантування енергії електрона є зміна характеру розсіювання. Дослідження польової і температурної залежностей магнітоопору в квантовій межі $\hbar\Omega > \bar{\epsilon}$ (Ω – циклотронна частота, $\bar{\epsilon}$ – характерна енергія електрона, що дорівнює koT у разі класичної статистики, або енергія Фермі ζ у разі виродження) дає змогу одержати інформацію про домінуючі механізми розсіювання.

Магнітофононний резонанс (МФР), що зумовлений непружним резонансним розсіюванням електронів на оптичних фонах, експериментально спостерігали в ряді бінарних [1–4] і елементарних напівпровідників [1, 5–8]. Зокрема, в n-Ge з концентрацією електронів від 2×10^{14} до $9,5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ було експериментально виявлено магнітофононні осциляції поперечного і поздовжнього магнітоопору в інтервалі температур 20–80 К в імпульсних магнітних полях до 300 кЕ [1, 5]. Однак нині не виконано досліджень впливу зовнішніх стимулюючих чинників на характер магнітофононних осциляцій, зокрема впливу одновісного механічного напруження. Також в жодній з відомих експериментальних робіт автори не спостерігали магнітофононні осциляції в сильно легованих зразках, хоча згідно з теоретичними передумовами МФР відбувається і в таких зразках.

Метою цієї роботи було вивчення впливу одновісної деформації і розігріву газу носіїв заряду на характер магнітофононних осциляцій поперечного і поздовжнього магнітоопору сильно легованих ниткоподібних кристалів Ge n- і p-типу провідності.

Об'єкт дослідження і методика експерименту

Об'єктом дослідження були мікрокристали Ge, вирощені методом хімічних транспортних реакцій з газової фази в закритій системі у формі ниток завдовжки 5–8 мм із поздовжньою віссю в кристалографічному напрямку $\langle 111 \rangle$, які в поперечному перерізі мали форму гексагональних призм з шириною грані 20–30 мкм. Мікрокристали Ge n-типу провідності під час росту легували Sb, а p-типу – Ga. Як ініціатори росту вводилися домішки золота і платини. Усі зразки були слабо компенсовані ($k < 0,01$). Електричні контакти і струмовиводи до них створювалися імпульсним зварюванням срібного мікродроту з мікрокристалом; контакти були омічними у всьому діапазоні досліджуваних температур. Параметри досліджуваних зразків наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Основні параметри досліджуваних зразків

Позначення зразків	Питомий опір $\rho_{300\text{K}}$, Ом×см	Тип провідності	Деформація зразка при T=4,2 К
Ge-1	1×10^{-3}	n	–
Ge-2	$0,8 \times 10^{-3}$	n	–
Ge-3	2×10^{-3}	n	$\varepsilon = +1,37 \times 10^{-3}$ відн. од. $\varepsilon = -4,38 \times 10^{-3}$ відн. од.
Ge-4	$2,2 \times 10^{-3}$	p	$\varepsilon = -4,38 \times 10^{-3}$ відн. од.

Вимірювання поперечного і поздовжнього магнітоопору сильно легованих мікрокристалів Ge n- і p-типу з $\rho_{300\text{K}} = (0,8-2,2) \times 10^{-3} \text{ Ом} \times \text{см}$ в магнітних полях з індукцією до 14 Тл з часом розгортки по полю 1,75 Тл/хв в діапазоні температур 4,2 – 77 К велись у межах міжнародної співпраці з Міжнародною лабораторією сильних магнітних полів та низьких температур (м. Вроцлав, Польща).

Одновісне механічне напруження мікрокристалів Ge створювалось закріпленням мікрокристала на підкладці за рахунок різниці коефіцієнтів термічного розширення Ge і матеріалу підкладки. Методика створення одновісного механічного напруження і значення розрахованої деформації при різних температурах наведені в [9]. Зокрема, підкладки з кварцу й алюмінію, на яких закріплювалися мікрокристали, забезпечували, відповідно, деформацію розтягу $\varepsilon = +1,37 \times 10^{-3}$ відн. од. і деформацію стиску $\varepsilon = -4,38 \times 10^{-3}$ відн. од. при T=4,2 К.

Експериментальні результати та їх обговорення

На рис. 1 наведено експериментальні залежності поперечного магнітоопору недеформованого (крива 1) і при деформації розтягу та стиску (крива 2 і 3) зразка n-Ge з $\rho_{300\text{K}} = 2 \times 10^{-3} \text{ Ом} \times \text{см}$ від індукції магнітного поля при температурі рідкого гелію. На вставці на рис.1 показано

осцилювальну частину поперечного магнітоопору як залежність від оберненого магнітного поля. Для цього самого зразка попередньо нами були виконані дослідження в поздовжньому магнітному полі [10].

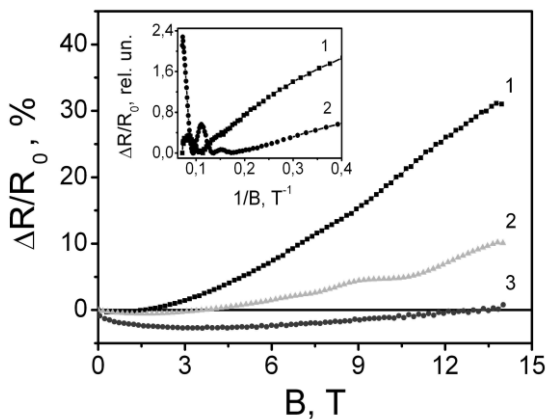


Рис. 1. Поперечний магнітоопір зразка Ge-3 при $T=4,2$ K при різних рівнях деформації: 1 – 0, 2 – $+1,37 \times 10^{-3}$, 3 – $-4,38 \times 10^{-3}$ відн. од.

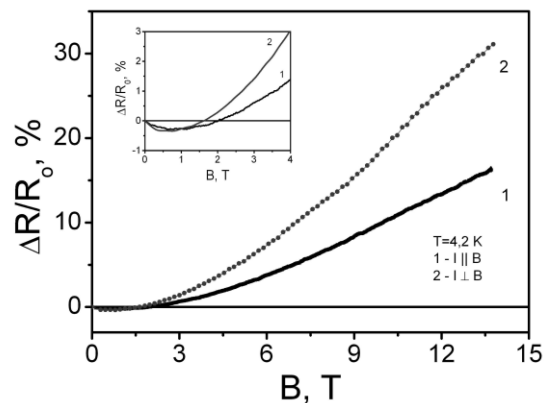


Рис. 2. Поздовжній і поперечний магніто-опір недеформованого зразка Ge-3 при $T=4,2$ K

Для недеформованого зразка Ge-3 в поперечному магнітному полі виявлені невеликі відхилення від монотонного ходу кривої польової залежності магнітоопору, проте для підтвердження факту наявності осциляційних піків необхідні будуть додаткові дослідження при вищих магнітних полях. Варто зауважити, що відношення осцилювальної частини магнітоопору до монотонної для Ge буде значно меншим, ніж для InSb, оскільки в Ge резонансні механізми розсіювання дають лише незначний внесок у загальне розсіювання [1]. При дуже низьких температурах амплітуда осциляцій буде визначатися не тепловим розмиттям рівнів Ландау, а їхнім розширенням здебільшого внаслідок неборнівського розсіювання носіїв заряду на домішках.

Дослідження осциляцій МФР недеформованого зразка Ge-3 з періодом $\Delta(1/B) = 0,041$ Тл⁻¹ та попередні наші дослідження [11] зразків Ge-1 і Ge-2 в поперечному магнітному полі, для яких було виявлено два максимуми, періодичні щодо оберненого поля з періодом $\Delta(1/B) = 0,04$ Тл⁻¹, підтверджують одну з характерних особливостей МФР – період магнітофононних осциляцій не залежить від концентрації носіїв заряду.

Виявлені в поперечному магнітному полі для зразка Ge-3 деформації розтягу два осциляційні максимуми, періодичні щодо оберненого поля з періодом $\Delta(1/B) = 0,042$ Тл⁻¹ (крива 2 на рис. 3). Для зразка Ge-3 при деформації стискання в поздовжньому магнітному полі виявлено чотири осциляційні мінімуми з періодом $\Delta(1/B) = 0,025$ Тл⁻¹ (крива 1 на рис. 4). Як показали дослідження поздовжнього магнітоопору цього самого зразка в інтервалі температур 4,2–69 К, амплітуда осциляцій максимальна при $T=4,2$ К, з підвищенням температури осциляції згасають.

Виявлені осциляції поздовжнього магнітоопору для зразка Ge-3 при деформації стискання поєднують характерні ознаки як магнітофононних, так і осциляцій Шубнікова–де Гааза. Автори [1, 12] спостерігали осциляції поздовжнього магнітоопору такого типу на вироджених зразках n-GaSb, n-HgTe, на їх думку, в такому разі основний внесок в опір дає пружне розсіювання на іонах домішки і в квантуючих магнітних полях основними будуть осциляції Шубнікова–де Гааза. Магнітофононні осциляції будуть проявлятися як невеликі “спотворення” на фоні осциляцій Шубнікова–де Гааза. Амплітуда шубніковських осциляцій із зростанням температури істотно зменшується, а так звані “спотворення” на їх фоні стають помітнішими при підвищенні температури від 4,2 К до 56 К.

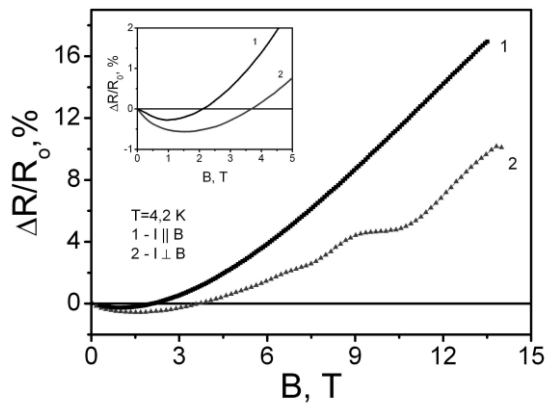


Рис. 3. Поздовжній і поперечний магнітоопір зразка Ge-3 при деформації розтягу $\varepsilon = +1,37 \times 10^{-3}$ відн. од. при $T = 4,2$ K

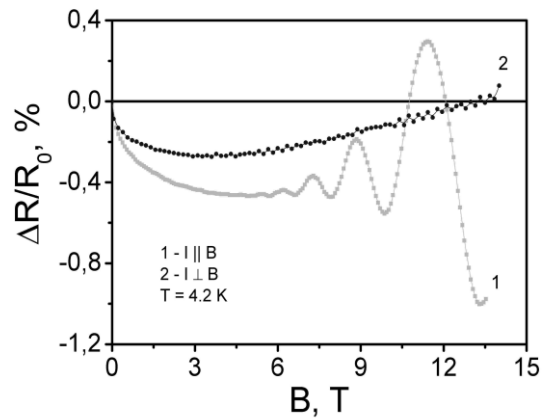


Рис. 4. Поздовжній і поперечний магнітоопір зразка Ge-3 при деформації стиску $\varepsilon = -4,38 \times 10^{-3}$ відн. од. при $T = 4,2$ K

Як видно з рис. 2–4, накладання одновісної деформації розтягу на зразок Ge n-типу з $\rho_{300K} = 2 \times 10^{-3}$ Ом \times см стимулює появу осциляцій магнітоопору в поперечному магнітному полі, а одновісної деформації стиску – навпаки, стимулює появу осциляцій магнітоопору в поздовжньому магнітному полі. Такий прояв впливу одновісної деформації на характер магнітофонних осциляцій можна пов'язати з міжмінімумним перерозподілом концентрації електронів у зоні провідності [13].

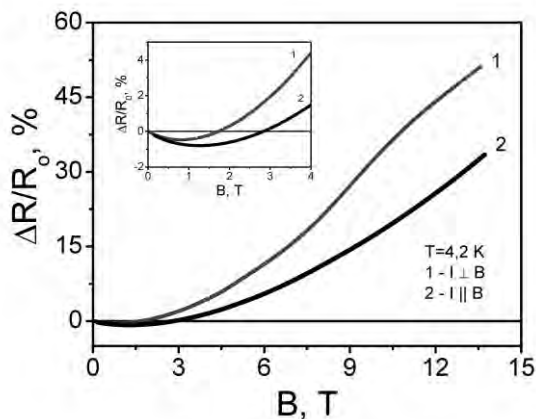


Рис. 5. Поздовжній і поперечний магнітоопір недеформованого зразка Ge-4 при $T = 4,2$ K

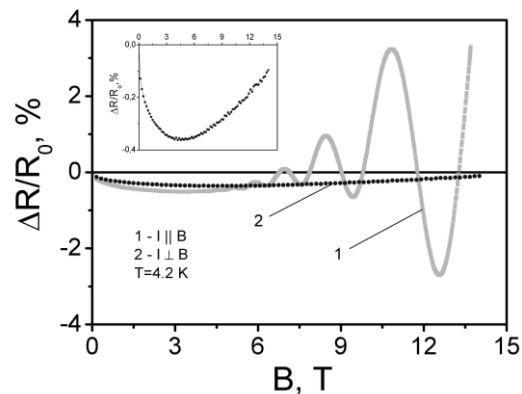


Рис. 6. Поздовжній і поперечний магнітоопір зразка Ge-4 при деформації стиску $\varepsilon = -4,38 \times 10^{-3}$ відн. од. при $T = 4,2$ K

Для зразка Ge-4 p-типу з $\rho_{300K} = 2,2 \times 10^{-3}$ Ом \times см недеформованого і при деформації стиску $\varepsilon = -4,38 \times 10^{-3}$ відн. од. при $T = 4,2$ K було виконано аналогічні дослідження в поперечному і поздовжньому магнітних полях. В поперечному магнітному полі для недеформованого зразка Ge-4 виявлено відхилення від монотонного ходу кривої польової залежності магнітоопору (крива 1 на рис. 5), які із зростанням температури від 4,2 K до 69 K зникають. Для зразка Ge-4 при деформації стиску в поздовжньому магнітному полі було виявлено чотири осциляційні мінімуми, які періодичні щодо оберненого магнітного поля з періодом $\Delta(1/B) = 0,026$ Тл $^{-1}$ (рис. 6). Накладання деформації стиску на зразок Ge-4 стимулює появу осциляційних піків на кривій поздовжнього магнітоопору.

Виявлені для зразка Ge-4 при деформації стиску польові залежності поздовжнього магнітоопору подібні до залежностей, що були виявлені для зразка Ge-3 при деформації стиску. Їх поява виключно при $I \parallel B$, а також характерна залежність їхньої амплітуди від температури вказує

на те, що ці осциляції також поєднують характерні риси і магнітофононних, і осциляцій Шубнікова–де Гааза.

Для досліджуваних зразків за положенням першого максимуму на кривій поперечного магнітоопору з боку більших магнітних полів, при відомому значенні граничної частоти оптичних фононів ω було визначено значення ефективної маси електронів для зразків Ge n-типу та ефективної маси легких дірок для зразків Ge p-типу, які становлять $m^* = 0,09m_0$ та $m^* = 0,041m_0$ відповідно.

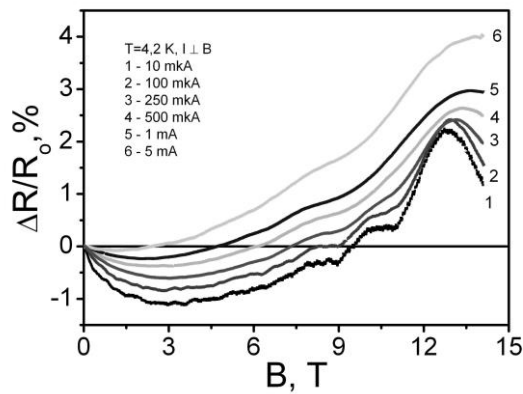


Рис. 7. Поперечний магнітоопір зразка Ge-3 при деформації розтягу при різних значеннях струму

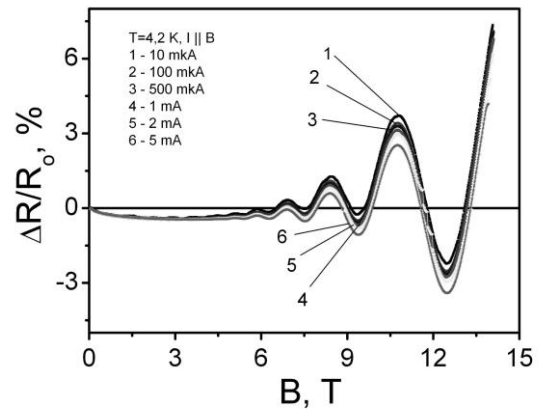


Рис. 8. Поздовжній магнітоопір зразка Ge-4 при деформації стиску при $T=4,2$ K при різних значеннях струму

Щоб встановити вплив розігріву носіїв заряду прикладанням високих електричних полів до досліджуваних зразків Ge n- і p-типу провідності на характер осциляцій поперечного і поздовжнього магнітоопору, було виконано дослідження магнітоопору при різних значеннях струму через зразок при температурі рідкого гелію. На рис. 7 та 8 наведені отримані експериментально залежності зразків Ge-3 при деформації розтягу $\epsilon=+1,37 \times 10^{-3}$ відн. од. та Ge-4 при деформації стиску $\epsilon=-4,38 \times 10^{-3}$ відн. од. при різних значеннях струму в діапазоні від 10 μ A до 5 mA.

Проаналізувавши графіки польових залежностей магнітоопору для обох зразків, що наведені на рис. 7 і 8, встановлено таке: амплітуда магнітофононних осциляцій помітно змінюється зі зростанням струму через зразок в межах від 10 μ A до 5 mA, і відповідно осциляційні піки, що відповідають вищим енергіям фононів, можна зарахувати до сильніше нагрітого газу носіїв заряду. Можна провести паралелі між отриманими польовими залежностями магнітоопору при різних значеннях струму розігріву в межах від 10 μ A до 5 mA та польовими залежностями магнітоопору при температурах в межах від 4,2 K до 50 K: положення осциляційних піків, фаза та період осциляцій магнітоопору не змінилися.

Висновки

- Виявлено і досліджено магнітофононні осциляції поздовжнього і поперечного магнітоопору в ниткоподібних кристалах Ge n- і p-типу провідності в магнітних полях до 14 Тл при температурах 4,2–70 K.
- Досліджено вплив одновісної деформації на характер магнітофононних осциляцій магнітоопору мікрочисталів Ge; зокрема, встановлено, що деформація стискання стимулює появу осциляційних піків на кривих поздовжнього магнітоопору в Ge n- і p-типу провідності, деформація розтягу призводить до появи чіткіших осциляційних піків на кривих поперечного магнітоопору Ge n-типу.
- Розраховано ефективні маси електронів $m^*=0,09m_0$ для Ge n-типу і легких дірок $m^*=0,041m_0$ для Ge p-типу з експериментальних даних дослідження магнітофононних осциляцій поперечного магнітоопору.

• Показано вплив розігрівання газу носіїв заряду на характер магнітофононних осциляцій мікрокристалів Ge n- і р-типу провідності: зі збільшенням струму розігріву величина амплітуди магнітофононних осциляцій зменшується.

1. Парфеньев Р.В., Харус Г.И., Цидильковский И.М., Шалым С.С. УФН. – 1974. – 112. – С. 1–36.
2. Stradling R.A., Wood R.A., J. PhysC: Solid State Phys. – 1970. – 3. – P. L94-L999.
3. Eaves L., Hoult R.A., Stradling R.A. et all. J. PhysC: Solid State Phys. – 1975. – 8. – P. 1034–1053.
4. Faugeras C., Maude D.K., Martinez G. et all. J. Phys Rev. B – 2004. – 69. – P. 073405-1 – 073405-4.
5. Глузман Н.Г., Любимов В.Э., Цидильковский И.М. ФТП. – 1973. – 7. – С. 1000–1001.
6. Eaves L., Hoult, R.A. Stradling R.A. et all. J. PhysC: Solid State Phys. – 1977. – 10. – P. 2831–2848.
7. Михеев В.М., Поморцев Р.В. ФТП. – 1980. – 14. – С. 346–351.
8. Licini J.C., Bishop D.J., Castner M.A., Melngailis J.. Phys. Rev. Lett. – 1985. – 55. – P. 2987.
9. Druzhinin A., Lavitska E., Maryamova I. et al. Crystal Research & Technology – 2002. – 37. – P. 243–257.
10. Дружинін А.О., Павловський І.В. Журнал фізичних досліджень. – 2004. – 8. – С. 365–368.
11. Дружинін А.О., Павловський І.В. Наукові записки НаУКМА: Фізико-математичні науки. – 2004. – 23. – С. 27–31.
12. Поморцев Р.В., Пономарев А.И., Харус Г.И., Цидильковский И.М. ЖЭТФ. – 1968. – 54. – С. 1347–1351.
13. Баранський П.І., Федосов А.В., Гайдар Г.П. Фізичні властивості кристалів кремнію та германію в полях ефективного зовнішнього впливу. – Луцьк, 2000.

УДК 621.315.592

О.П. Малик, Г.В. Кеньо, І.В. Петрович

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра напівпровідникової електроніки

РОЗСІЯННЯ ЕЛЕКТРОНІВ НА БЛИЗЬКОДІЮЧОМУ ПОТЕНЦІАЛІ У ТВЕРДОМУ РОЗЧИНІ $Cd_xHg_{1-x}te$ ($x=0.52; 0.59, 1$)

© Малик О.П., Кеньо Г.В., Петрович І.В., 2005

O.P. Malyk, G.V. Kenyo, I.V. Petrovych

ELECTRON SCATTERING ON THE SHORT-RANGE POTENTIAL IN $Cd_xHg_{1-x}te$ ($x=0.52; 0.59, 1$) SOLID SOLUTION

© Малик О.П., Кеньо Г.В., Петрович І.В., 2005

Розглядаються моделі розсіяння електронів на близькодійуючому потенціалі зумовленому взаємодією з полярними та неполярними оптичними фононами, п'єзоелектричними та акустичними фононами, іонізованими домішками в широкозонному $Cd_xHg_{1-x}Te$ ($x=0.52; 0.59; 1.0$). Розраховані температурні залежності рухливості електронів в інтервалі 4.2 – 300 К.

Models of electron scattering on the short-range potential caused by interaction with polar and nonpolar optical phonons, piezoelectric and acoustic phonons, ionized impurities in a wide gap solid solution $Cd_xHg_{1-x}Te$ ($x=0.52; 0.59; 1.0$) are considered. The temperature dependences of electron mobility in temperature range 4.2 – 300 K are calculated.

1. Вступ

Розсіяння електронів у твердому розчині $Cd_xHg_{1-x}Te$ розглядалось в наближенні часу релаксації у роботах [1–4]. Однак розглянуті в цих роботах моделі розсіяння мають один істотний