

УДК 621.315.592

А.О. Дружинін, І.П. Островський, Н.С. Лях-Кагуй, А.М. Вуйцик
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра напівпровідникової електроніки

МАГНЕТОФОНОННИЙ РЕЗОНАНС У НИТКОПОДІБНИХ КРИСТАЛАХ ГЕРМАНІЮ

Ó Дружинін А.О., Островський І.П., Лях-Кагуй Н.С., Вуйцик А.М., 2013

A.A. Druzhinin, I.P. Ostrovskii, N.S. Liakh-Kaguy, A.M. Vuytsyk

MAGNETOPHONONE RESONANCE IN GERMANIUM WHISKERS

Ó Druzhinin A.A., Ostrovskii I.P., Liakh-Kaguy N.S., Vuytsyk A.M., 2013

Досліджено магнетофононні осциляції магнетоопору в сильнолегованих ниткоподібних кристалах Ge n-типу провідності з концентрацією домішки, що відповідає переходу метал-діелектрик, в інтервалі температур 4,2–70 К у неперервних та імпульсних магнітних полях з індукцією 14 Тл та 35 Тл, відповідно. Вивчено вплив одновісної деформації стиску та розтягу на магнетофононні осциляції поперечного і поздовжнього магнетоопору, визначено між-долинні переходи, оцінено енергії фононів та ефективні маси важких та легких електронів в НК n-Ge.

Ключові слова: ниткоподібний кристал, германій, магнітофононний резонанс.

Magnetophonone oscillations of magnetoresistance in heavily doped n-Ge whiskers with impurity concentration that corresponds to metal-insulator transition were studied in the temperatures range 4,2–70 K in continuous and pulse magnetic fields up to 14 T and 35 T respectively. The influence of uniaxial compressive and tentative strain on the magnetophonon oscillations of longitudinal and transverse magnetoresistance of n-Ge whiskers were studied, the intervalley transitions were determined, phonon energy as well as the effective masses of light and heavy electrons in n-Ge whiskers were estimated.

Key words: whisker, germanium, magnetophonon resonance.

Вступ

Магнетофононний резонанс широко досліджували у напівпровідникових кристалах [1–7], оскільки його вивчення давало змогу з'ясувати характер електрон-фононної взаємодії, дослідити зонну структуру кристалів. Це явище залишається в полі вивчення дослідників і сьогодні [8–13]. Однак, на відміну від попередніх робіт, де досліджували здебільшого масивні зразки, в центрі уваги сучасних досліджень знаходяться квантові ями та надгратки типових напівпровідникових кристалів: n-Ge [8–9], n-GaAs, GaAlAs [8, 10], графен [11–13]. З цього погляду інтерес становить дослідження магнетофононного резонансу ниткоподібних кристалів Ge. У ниткоподібних кристалах виявлено низку ефектів, нетипових для масивних зразків: зміна параметра ґратки [14], зміщення смуг фундаментального оптичного поглинання в короткохвильову область спектра та поява нових смуг люмінесценції нетипових для масивних кристалів, пов'язаних з впливом лапласового стиску на властивості кристалів [15]. Необхідно зауважити, що питання впливу деформації на поведінку магнетофононного резонансу в напівпровідниках вивчали лише в деяких публікаціях [10, 12]. У той

же час це питання дуже актуальне для наноелектронних пристроїв, у яких практично не вдається уникнути впливу деформації.

У попередній роботі [16] досліджено вплив одновісної деформації розтягу і стиску на магнетоопір сильнолегованих НК германію n- і p-типу провідностей. Дослідження НК n-Ge виявили, що одновісна деформація розтягу стимулює появу осциляцій магнетоопору в поперечному магнітному полі, в той час як дія одновісної деформації стиску приводить до осциляцій магнетоопору в поздовжньому магнітному полі, що зумовлено перерозподілом концентрацій електронів між мінімумами зони провідності германію n-типу провідності під дією деформації. Однак у цій роботі дослідження магнетоопору проводили в магнітних полях до 14 Тл, де спостерігалось лише два осциляційних максимуми, тому складно було інтерпретувати одержані результати. Необхідно провести дослідження в сильних магнітних полях до 35 Тл, де буде спостерігатись більша кількість осциляційних максимумів, що дозволить визначити період їх повторення. У роботі [16] також не були класифіковані міждолинні переходи і не визначені енергії фононів.

Тому метою роботи є узагальнення і уточнення поведінки магнетоопору НК Ge n-типу провідності під дією одновісної деформації розтягу та стиску в сильних магнітних полях з індукцією до 35 Тл для визначення характеру магнетофононої взаємодії, типу внутрідолинних та міждолинних переходів, які відповідають появі осциляційних максимумів на польових залежностях магнетоопору, на основі порівняння одержаних результатів з відомими теоретичними та експериментальними даними.

Методика експерименту

НК Ge вирощували методом хімічних транспортних реакцій з газової фази в закритій системі. Кристали мали форму гексагональних призм з поздовжньою віссю в кристалографічному напрямку $\langle 111 \rangle$ та діаметри 10 – 60 мкм. Мікрокристали Ge n-типу провідності під час росту легували домішкою Sb. Як ініціатори росту вводились домішки золота та платини. Усі зразки були слабо компенсовані ($k < 0,01$) [17]. Концентрація легуючої домішки у кристалах відповідала концентрації, близькій до переходу метал-діелектрик (ПМД). Електричні контакти та струмовиводи до них створювались імпульсним зварюванням срібного мікродроту з мікрокристалом; контакти були омичними у всьому діапазоні досліджуваних температур. Оскільки для НК малих розмірів важко створити холлівські контакти, провести холлівські дослідження та визначити концентрацію домішок, для характеристики зразків ми використовуємо їх питомий опір при кімнатній температурі. За умови слабкої компенсації зразків, за питомим опором можна приблизно оцінити концентрацію донорних домішок у кристалі. Близькості до ПМД відповідають зразки з питомим опором $\rho_{300\text{K}} = 0,02 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Одновісне механічне напруження НК Ge створювалось шляхом закріплення мікрокристала на підкладці за рахунок різниці коефіцієнтів термічного розширення Ge та матеріалу підкладки. Методику створення одновісного механічного напруження та величини розрахованої деформації за різних температур наведено в роботах [8, 9]. Зокрема, підкладки з кварцу і алюмінію, на яких закріплювались мікрокристали, забезпечували, відповідно, відносну деформацію розтягу $\varepsilon = 1,37 \times 10^{-3}$ та стиску $\varepsilon = -4,38 \times 10^{-3}$ за температури 4,2 К.

Вимірювання магнетоопору сильнолегованих НК n-Ge з $\rho_{300\text{K}} = 0,008 - 0,022 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ проводили на біттерівському магніті в полях з індукцією до 14 Тл в діапазоні температур 4,2 – 70 К, а в магнітних полях з індукцією до 35 Тл – на імпульсному магніті за температури рідкого гелію в Міжнародній лабораторії сильних магнітних полів і низьких температур (м. Вроцлав, Польща). У всіх досліджуваних зразках струм пропускався вздовж напрямку [111], а магнітне поле прикладалося у напрямках: $B \parallel [111]$, $B \parallel [110]$ та $B \perp [111]$.

Експериментальні результати та їх обговорення

Поперечний магнетоопір сильнолегованих НК Ge n-типу провідності з питомим опором $\rho_{300\text{K}} = 0,008 - 0,022 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ досліджувався за температури рідкого гелію, як за відсутності

деформації (рис. 1), так і за деформації зразків розтягом та стиском (рис. 2). Як видно з рис. 1 та 2, на залежностях магнетоопору напрямку $B \perp [111]$ для недеформованих НК n-Ge виявлені осциляційні максимуми лише для зразків з питомим опором $\rho_{300K} = 0,01 \text{ Ом} \times \text{см}$, а для зразків з питомим опором $\rho_{300K} = 0,02 \text{ Ом} \times \text{см}$ осциляційні максимуми магнетоопору з'являються лише за деформації розтягу (рис. 2). Виявлені осциляційні максимуми магнетоопору періодичні відносно оберненого поля з періодом $\Delta(1/B) = 0,04 \text{ Тл}^{-1}$ та $\Delta(1/B) = 0,041 \text{ Тл}^{-1}$ для недеформованого та деформованого розтягом зразків. Враховуючи співвідношення $\Delta(1/B) = e/m^* \omega_p$, де e – заряд електрона, m^* – ефективна маса електрона в певній долині, ω_p – частота фонона, за участю якого відбувається внутрідолинний, або міждолинний перехід електрона, були визначені переходи у недеформованих НК германію. Виявлені максимуми магнетофонних осциляцій зумовлені внутрідолинними переходами між рівнями Ландау в долині з циклотронною ефективною масою $m_L = 0,082 m_e$ за участю поперечного оптичного фонона в L-точці зони Бріллюена з енергією $E_{TO} = 36,15 \text{ меВ}$ [18].

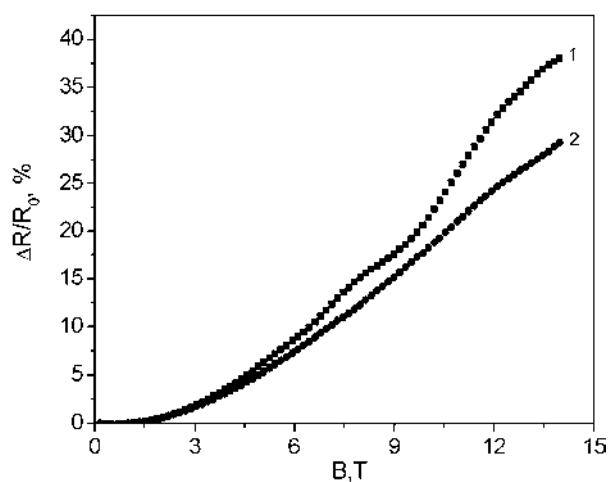


Рис. 1. Магнетоопір у напрямку $J \parallel [111], B \perp [111]$ за температури 4,2 К для НК n-Ge з питомим опором: $\rho_{300K} = 0,01 \text{ Ом} \times \text{см}$ (1); $\rho_{300K} = 0,008 \text{ Ом} \times \text{см}$ (2)

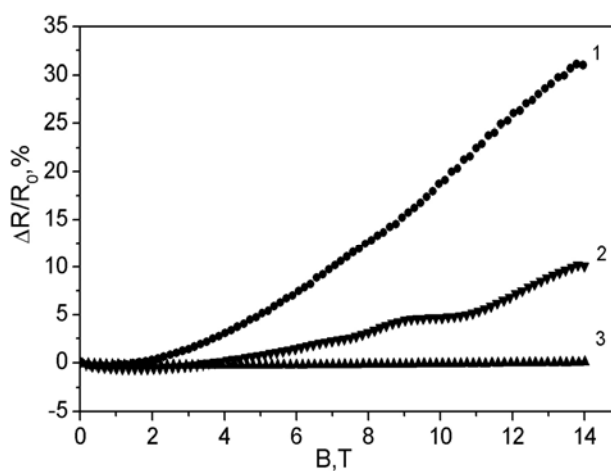


Рис. 2. Магнетоопір в напрямку $J \parallel [111], B \perp [111]$ НК n-Ge за температури 4,2 К: недеформований зразок (1); при деформації розтягу (2); при деформації стиску (3)

Прикладання відносної деформації розтягу $\epsilon = 1,37 \times 10^{-3}$ приводить до незначного зменшення частоти оптичного фонона [19] $E_{TO} = 36,05 \text{ меВ}$, що відображається незначною зміною періоду $\Delta(1/B) = 0,041 \text{ Тл}^{-1}$. Як показали дослідження впливу деформації на температурні залежності опору НК германію для цих зразків (рис. 3), деформація розтягу не змінює характеру зміни опору з температурою (див. криві 1 і 3). Тобто, можна припустити, що інтерпретація виявлених магнетофонних осциляцій є однаковою для недеформованих і деформованих розтягом зразків. На основі проведених досліджень можна зробити ще один висновок про підтвердження однієї з характерних особливостей магнетофонного резонансу, що період магнетофонних осциляцій, зумовлених однаковим внутрідолинним переходом, не залежить від концентрації носіїв заряду.

Прикладання відносної деформації стиску $\epsilon = -4,38 \times 10^{-3}$ (крива 2 на рис. 3) приводить до перекидання зразка через ПМД, в результаті температурний хід опору змінюється з металевого на напівпровідниковий. У цьому випадку під впливом деформації знімається виродження, а ізоелектронні долини розщеплюються на долини з легкою і важкою циклотронною ефективною масою електрона, що відповідають напрямку поширення носіїв у кристалі. Так, для напрямку $[111]$ циклотронна ефективна маса важких електронів $m_H = 0,207 m_e$, а легких – $m_L = 0,082 m_e$.

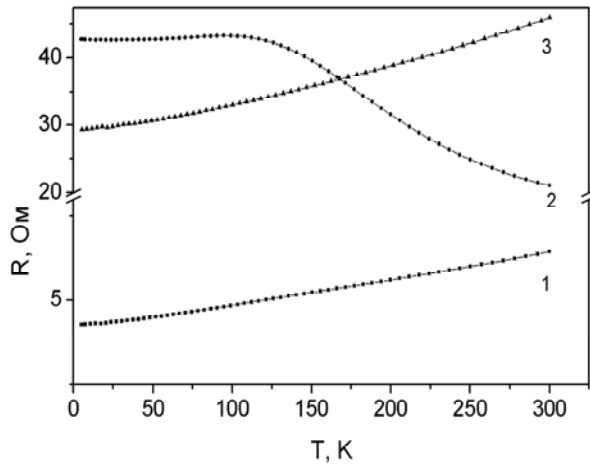


Рис. 3. Температурна залежність опору НК германію з $\rho_{300K} = 0,02 \text{ Ом} \times \text{см}$ недеформованих (1), під дією відносної деформації стиску $\varepsilon = -4,38 \times 10^{-3}$ (2) і розтягу $\varepsilon = 1,37 \times 10^{-3}$ (3)

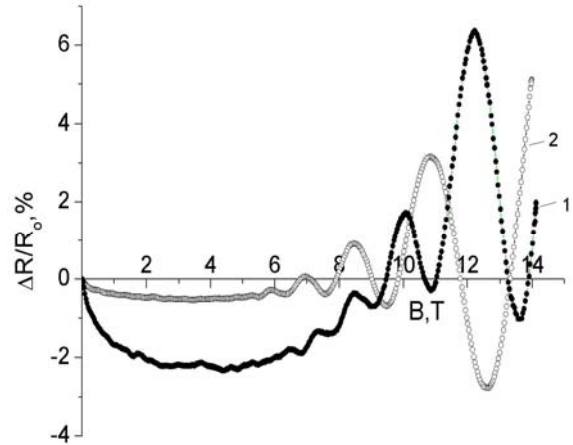


Рис. 4. Магнетоопір в напрямку $J \parallel B \parallel [111]$ (1), $J \parallel [111], B \parallel [110]$ (2) для НК n-Ge з $\rho_{300K} = 0,022 \text{ Ом} \times \text{см}$ під дією відносної деформації стиску $\varepsilon = -4,38 \times 10^{-3}$ за температури 4,2 К

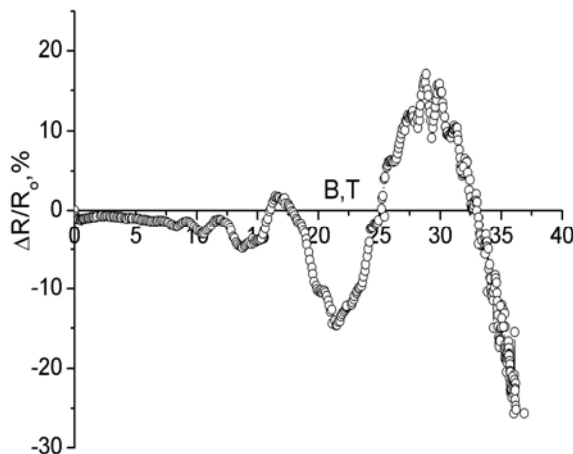


Рис. 5. Магнетоопір в напрямку $J \parallel B \parallel [111]$ для НК n-Ge з $\rho_{300K} = 0,022 \text{ Ом} \times \text{см}$ в імпульсних магнітних полях під дією відносної деформації стиску $\varepsilon = -4,38 \times 10^{-3}$ за температури 4,2 К

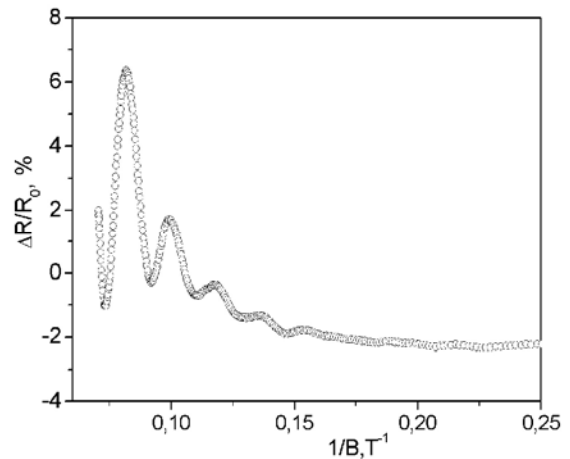


Рис. 6. Магнетоопір в напрямку $J \parallel [111], B \parallel [110]$ від оберненого поля для НК n-Ge з питомим опором $\rho_{300K} = 0,022 \text{ Ом} \times \text{см}$ під дією відносної деформації стиску $\varepsilon = -4,38 \times 10^{-3}$ за температури 4,2 К

Як видно з рис. 2, у деформованих стиском зразках відсутні осциляції магнетоопору в напрямку $J \parallel [111], B \perp [111]$. Натомість деформація розтягу приводить до появи значних магнетофонних осциляцій магнетоопору в напрямку $J \parallel B \parallel [111]$. На рис. 4 наведено магнетоопір в напрямку $J \parallel B \parallel [111]$ для НК германію n-типу провідності з питомим опором $\rho_{300K} = 0,022 \text{ Ом} \times \text{см}$ в магнітному полі 0 – 14 Тл під дією однобічної деформації стиску $\varepsilon = -4,38 \times 10^{-3}$ за температури 4,2 К. На залежностях магнетоопору в напрямку $J \parallel [111], B \parallel [110]$ в магнітному полі з індукцією до 14 Тл виявлено чотири осциляційних максимуми (рис. 4, крива 1). Для геометрії експерименту $J \parallel B \parallel [111]$ на рис. 4 (крива 2) спостерігається чотири осциляційні максимуми, а на рис. 5 (в імпульсних полях до 35 Тл) – шість осциляційних максимумів.

Виявлені осциляційні максимуми магнетоопору в геометрії експерименту $J \parallel B \parallel [111]$ (рис. 4, крива 2) періодичні відносно оберненого поля з періодом $\Delta(1/B) = 0,025 \text{ Тл}^{-1}$, тоді як для геометрії експерименту $J \parallel [111], B \parallel [110]$ період осциляцій становить $\Delta(1/B) = 0,018 \text{ Тл}^{-1}$ (рис. 6).

Для інтерпретації одержаних результатів, а також класифікації міждолинних переходів і визначення енергії фононів, наведемо енергетичні діаграми для НК n-Ge з питомим опором $\rho_{300K} = 0,022 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ у магнітному полі, отримані з теоретичної роботи [5] (рис. 7 та 8). Точками на графіку позначені виявлені нами експериментальні піки магнетофононних осциляцій.

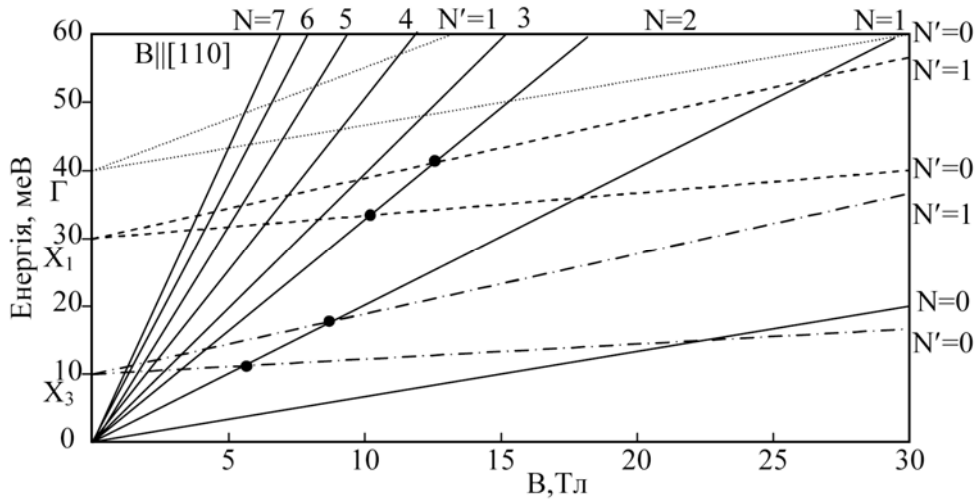


Рис. 7. Енергетична діаграма для НК n-Ge з питомим опором $\rho_{300K} = 0,022 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ у магнітному полі в напрямку $J \parallel [111]$, $B \parallel [110]$ під дією відносної деформації стиску $\epsilon = -4,38 \times 10^{-3}$ за температури 4,2 К. Точками на графіку позначені виявлені експериментальні піки магнетофононних осциляцій

З рис. 4 (крива 1) видно, що осциляційні максимуми поздовжнього магнетоопору $J \parallel [111]$, $B \parallel [110]$, що відповідають індукції магнітного поля 7 Тл та 8,3 Тл, зумовлені міждолинними переходами електрона з долини з важкою циклотронною ефективною масою $m_H = 0,207 m_e$ в долину з легкою циклотронною ефективною масою $m_L = 0,082 m_e$ за участю поперечного акустичного фонона в X-точці зони Бріллюена з енергією $E_{TA} = 9,93 \text{ меВ}$ (рис. 7, переходи з $N' = 0$ та $N' = 1$ в $N = 1$, відповідно).

Максимуми магнетоопору в напрямку $J \parallel [111]$, $B \parallel [110]$ за індукції магнітного поля 10 Тл і 12 Тл відповідають переходам електронів за участю поздовжнього оптичного та поздовжнього акустичного фононів в X-точці зони Бріллюена з енергією $E_{LO-LA} = 29,8 \text{ меВ}$ (рис. 7, переходи з $N' = 0$ та $N' = 1$ в $N = 2$, відповідно).

На рис. 4 (крива 2) виявлено, що осциляційний максимум магнетоопору в напрямку $J \parallel B \parallel [111]$, що відповідає індукції магнітного поля 6,5 Тл зумовлений міждолинним переходом електрона з долини з важкою циклотронною ефективною масою $m_H = 0,207 m_e$ в долину з легкою циклотронною ефективною масою $m_L = 0,082 m_e$ за участю поперечного акустичного фонона в X-точці зони Бріллюена з енергією $E_{TA} = 9,93 \text{ меВ}$ (рис. 8, перехід з $N' = 0$ в $N = 1$).

Максимуми магнетоопору в напрямку $J \parallel B \parallel [111]$ за індукції магнітного поля 17,5 Тл, 9 Тл та 7,5 Тл відповідають міждолинним переходам електронів з долини з важкою циклотронною в долини з легкою циклотронною ефективною масою за участю поздовжнього оптичного фононів в X-точці зони Бріллюена з енергією оптичного фонона $E_{Lo} = 29,8 \text{ меВ}$ (рис. 8, переходи з $N' = 0$ в $N = 1$, $N = 2$ та $N = 3$, відповідно). А максимум за індукції 28 Тл зумовлений міждолинним переходом електрона за участю поздовжнього оптичного фонона в Γ -точці зони Бріллюена з енергією $E_{TA} = 37,3 \text{ меВ}$ (рис. 8, перехід з $N' = 0$ в $N = 1$).

Цікавою особливістю виявлених переходів є обмежений температурний інтервал їх існування. На рис. 9 та 10 наведено результати впливу температури на поведінку магнетоопору цих же НК під дією деформації розтягу та стиску, відповідно.

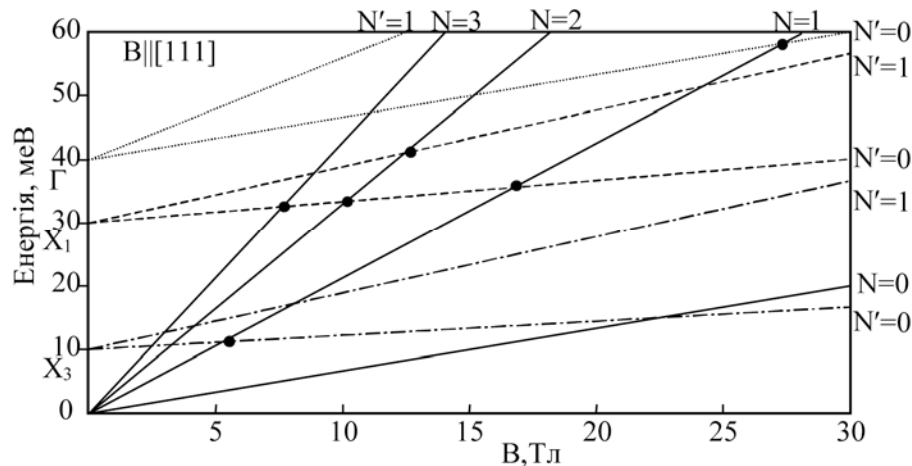


Рис. 8. Енергетична діаграма для НК n-Ge з питомим опором $\rho_{300\text{K}} = 0,022 \text{ Ом} \times \text{см}$ у магнітному полі в напрямку $J \parallel B \parallel [111]$ під дією відносної деформації стиску $\varepsilon = -4,38 \times 10^{-3}$ за температури 4,2 К. Точками на графіку позначені виявлені експериментальні піки магнетофононних осциляцій

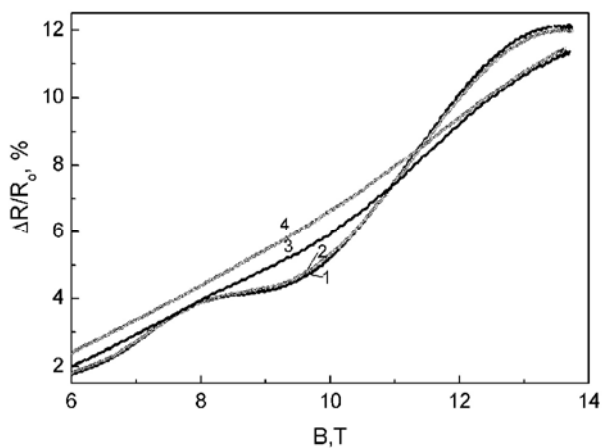


Рис. 9. Температурні залежності магнетоопору в напрямку $J \parallel [111]$, $B \perp [111]$ НК n-Ge з $\rho_{300\text{K}} = 0,02 \text{ Ом} \times \text{см}$ під дією відносної деформації розтягу $\varepsilon = 1,37 \times 10^{-3}$ за різних температур: 4,2 К (1), 23 К (2), 36 К (3), 50 К (4)

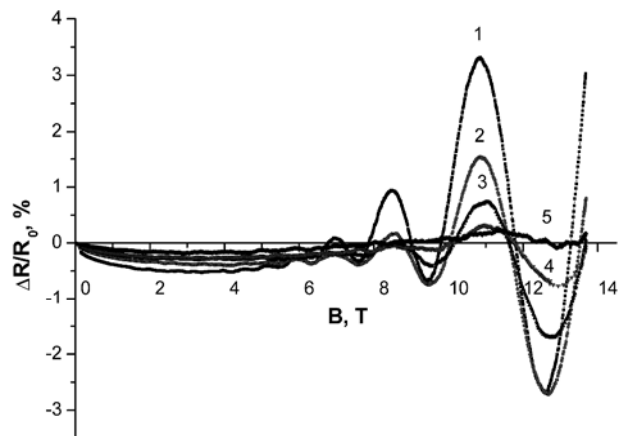


Рис. 10. Температурні залежності магнетоопору в напрямку $J \parallel B \parallel [111]$ для НК n-Ge з $\rho_{300\text{K}} = 0,02 \text{ Ом} \times \text{см}$ під дією відносної деформації стиску $\varepsilon = -4,38 \times 10^{-3}$ за різних температур: 4,2 К (1), 12 К (2), 22 К (3), 35 К (4), 54 К (5)

З наведених на рис. 9 температурних залежностей магнетоопору в напрямку $J \parallel [111]$, $B \perp [111]$ для НК n-Ge з питомим опором $\rho_{300\text{K}} = 0,02 \text{ Ом} \times \text{см}$ під дією деформації розтягу, зрозуміло, що амплітуда осциляційних піків максимальна за температури 4,2 К, а період осциляцій магнетоопору не залежить від температури. Як видно з рис. 9, з збільшенням температури величина піка зменшується і за температури 36 К крива є монотонною (крива 3 на рис. 9). Як видно з рис. 10, для магнетоопору в напрямку $J \parallel B \parallel [111]$, найбільшу амплітуду осциляційних піків виявлено за температури 4,2 К і з підвищенням температури до 35 К спостерігається їх практичне загасання.

Порівняно низький температурний інтервал розсіювання носіїв на акустичних і навіть оптичних фонах пов'язаний, на нашу думку, з впливом деформації на властивості сильнолегованих НК поблизу ПМД. Подібну поведінку раніше спостерігали при дослідженні п'єзотермо-ЕРС сильнолегованих НК Si-Ge, для яких в області температур 4,2 К – 20 К спостерігалось різке зростання коефіцієнта Зеєбека за накладання деформації, яке пов'язувалося зі захопленням носіїв фонами [20].

Для подальшого вивчення розсіювання носіїв на оптичних фононах доцільно провести дослідження магнетофононних осциляцій НК n-Ge в інтервалі вищих температур 100 – 250 К.

Висновки

Виявлено магнетофононні осциляції магнетоопору в НК германію n-типу провідності з концентрацією домішки Sb, що відповідає переходу метал-діелектрик, в діапазоні температур 4,2 – 30 К. Осциляції магнетоопору в напрямку ($J \parallel B \perp [111]$) спостерігаються у зразках легованих до концентрацій поблизу ПМД з металевого боку у недеформованих НК з $\rho_{300\text{K}} = 0,01 \text{ Ом}\times\text{см}$. При наближенні до ПМД ($\rho_{300\text{K}} = 0,02 - 0,022 \text{ Ом}\times\text{см}$) осциляції стимулюються відносною деформацією розтягу $\varepsilon = 1,37 \times 10^{-3}$. На основі визначення періоду повторення осциляційних максимумів в оберненому полі $\Delta(1/B) \approx 0,04 \text{ Тл}^{-1}$, враховуючи геометрію експерименту, було показано, що виявлені максимуми магнетофононних осциляцій зумовлені внутрідолинними переходами між рівнями Ландау в долині з ефективною масою $m_L = 0,082 m_e$ за участю поперечного оптичного фонона в L-точці зони Бріллюена з енергією $E_{TO} \approx 36,15 \text{ меВ}$.

Магнетофононні осциляції магнетоопору спостерігаються у зразках легованих до концентрацій поблизу ПМД з діелектричного боку з $\rho_{300\text{K}} = 0,02 - 0,022 \text{ Ом}\times\text{см}$ під дією деформації стиску. Виявлені осциляційні максимуми магнетоопору в геометрії експерименту $J \parallel B \parallel [111]$ періодичні відносно оберненого поля з періодом $\Delta(1/B) = 0,025 \text{ Тл}^{-1}$, тоді як для геометрії експерименту $J \parallel [111]$, $B \parallel [110]$ період осциляцій становить $\Delta(1/B) = 0,018 \text{ Тл}^{-1}$. Виявлені осциляції зумовлені міждолинним резонансним розсіюванням електронів, зокрема їх міждолинними переходами між рівнями Ландау з долини з важкою циклотронною ефективною масою $m_H = 0,082 m_e$ в долину з легкою циклотронною ефективною масою $m_L = 0,207 m_e$ за участю акустичних та оптичних фононів в Γ , X_1 та X_3 -точках зони Бріллюена з енергією $E_{TA} = 37,3 \text{ меВ}$, $E_{TA} = 9,93 \text{ меВ}$ та $E_{LO} = 29,8 \text{ меВ}$, відповідно.

Як показали експериментальні дослідження, величина і знак прикладеного одновісного механічного напруження поряд з величиною магнітного поля та температури є визначальними факторами, за допомогою яких можна керувати значенням амплітуди магнетофононних осциляцій. Обмежений температурний інтервал (4,2 – 30 К) спостереження магнетофононних осциляцій в НК n-Ge ймовірно зумовлений впливом деформації на властивості сильнолегованих НК поблизу ПМД.

1. Yoshikazu Hirose, Takashi Tsukahara, Chihiro Hamaguchi. *Magnetophonon Resonance in n-Type Germanium at Low Temperatures* // *Journal of the Physical Society of Japan*. – 1983. – Vol. 52, No. 12. – P. 4291–1299.
2. Hamaguchi C., Hirose Y., Shimomae K. *Magnetophonon and magnetoimpurity resonances in N-Germanium* // *Lecture Notes in Physics*. – 1983. – Vol. 177. – P. 423–426.
3. Hideki Futagawa, Noboru Miura, Koji Yamada, Norihiko Kamata et.al. *The Role of the Effective Mass in the Hot-Electron Magnetophonon Resonance in n-Type Germanium* // *Journal of the Physical Society of Japan*. – 1993. – Vol. 62, No.12. – P.4407-4413.
4. Kamata N., Futagawa H., Yamada K., Miura N. et.al. *Hot-electron magnetophonon resonance in n-type germanium in pulsed high magnetic fields up to 40 T* // *Semicond. Sci. Technol.* – 1992. – Vol. 7. – P. 639–641.
5. Sang Chil Lee, Ji Yon Kim, Doo Chul Kim, Dong Lak Kimy et.al. *Transverse and Longitudinal Hot-Electron Magnetophonon Resonance in n-type Germanium* // *Journal of the Korean Physical Society*. – 1998. – Vol. 32, No. 1. – P. 138–143.
6. Schneider D., Brink, C. Irmer G., Verma P. *Effective mass and band structure of n-InAs from magnetophonon resonance and Raman scattering at temperatures between T=64 and 360K* // *Physica B: Physics of Condensed Matter*. – 1998. – Vol. 256. – Issue 1–4. – P. 625–628.
7. Faugeras C., Maude D.K., Martinez G., Rigal L.B. et.al. *Magnetophonon resonance in high density, high mobility quantum well systems* // *Phys. Rev.* – 2004. – B 69. – P. 673405.

8. Dong Shik Kang, Sang Chil Lee and Suck Whan Kim. *Magnetophonon Resonance by Quantum Size Effects in n-Ge-based and n-GaAs-based Quantum-dot Superlattices* // *Journal of the Korean Physical Society*. – 2010. – Vol. 57, No. 4. – P. 760–767.
9. N. Miura, N. V. Kozlova, K. Dörr, J. Freudenberger et.al. *Quantum Transport and Cyclotron Resonance Study of Ge/SiGe Quantum Wells in High Magnetic Fields* // *Journal of Low Temperature Physics*. – 2010. – Vol. 159, Issue 1–2. – P. 222–225.
10. Tomaka G., Sheregii Eugen M., Cebulski J., Sciuk W. Włodzimierz Strupinski; Lech Dobrzanski. *Investigation of the strain layers in multiple quantum wells by magnetophonon resonance* // *Proceedings SPIE*. – 2000. – Vol. 4413. – P. 248.
11. Kim Y., Poumirol J. M., Lombardo A., Kalugin N. G. et.al. *Filling-Factor-Dependent Magnetophonon Resonance with Circularly Polarized Phonons in Graphene Revealed by High-Field Magneto-Raman Spectroscopy* // *Condens. Matter*. – 2012. – No. 1211. – P. 6094.
12. Kashuba O., Fal'ko V. I. *Interplay between uniaxial strain and magnetophonon resonance in graphene* // *Phys.Rev.B*. – 2013. – Vol. 87. – P. 161404.
13. Kashuba O., Fal'ko V. I. *Role of electronic excitations in magneto-Raman spectra of graphene* // *New Journal of Physics*. – 2012. – Vol. 14. – P. 105016.
14. Klimovskaya A.I., Prokopenko I.V., Svechnikov S.V., Ostrovskii I.P. et.al. *Nanoporous wire-like superstructure of silicon and silicon/germanium solid solution* // *Mater.Sci and Engeneer.* – 2002. – Vol. C19. – P.205–208.
15. Gule E.G., Rudko G.Yu., Klimovskaya A.I., Valakh M.Ya., Ostrovskii I.P. *Visible light emission from free-standing filament crystals of silicon* // *Phys. Stat. Solid. B*. – 1997. – Vol. 161. – P. 565.
16. Дружинін А.О., Мар'ямова І.Й., Павловський І.В., Ховерко Ю.М. *Осциляції магнетоопору ниткоподібних кристалів германію при криогенних температурах* // *Вісник НУ Львівська політехніка. Електроніка* – № 532. – 2005. – С. 112–117.
17. Druzhinin A., Hortynska I., Maryamova I. et.al. *Investigation of free and strained germanium whiskers at cryogenic temperatures* // *Proceedings of SPIE*. – Vol. 4413. – 2001. – P. 143–147.
18. Payne R. T. *Phonon Energies in Germanium from Phonon-Assisted Tunneling* // *Phys. Rev.* – 1965. – Vol. 139. – P. A570–A582.
19. Voronovski N., Dizhur E.M., Itskevich E.S. *Change of phonon energy in germanium at pressures up to 3 GPa* // *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* – 1979. – Vol. 77. – P. 1119–1123.
20. Дружинін А.О., Островський І.П., Лях Н.С., Матвієнко С.М. *Термо-е.р.с. ниткоподібних кристалів твердого розчину Si-Ge* // *Журнал фізичних досліджень*. – 2005. – Т. 9, № 1. – С. 71–74