

МАГНЕТОФОНОННИЙ РЕЗОНАНС В НИТКОПОДІБНИХ КРИСТАЛАХ Ge *n*-ТИПУ

А. Дружинін, І. Павловський

НУ “Львівська політехніка”, НДЦ “Кристал”

(Отримано 4 липня 2003 р.; в остаточному вигляді — 25 травня 2004 р.)

Експериментально досліджено магнетофононні осциляції поперечного й поздовжнього магнетоопору сильнолегованих ниткоподібних кристалів Ge *n*-типу провідності в діапазоні температур 4.2–70 К в магнетних полях з індукцією до 14 Тл. Осциляції зумовлені міждолинним резонансним розсіюванням електронів на фононах. Установлено, що положення та амплітуда осциляційних піків суттєво залежать від температури й від деформації. З експериментальних даних розраховано ефективну масу електронів.

Ключові слова: магнетоопір, магнетофононний резонанс, низькі температури, германій, ниткоподібні кристали.

PACS number(s): 71.30+h, 72.20.Mu

ВСТУП

$$\Omega\tau \gg 1, \quad (2)$$

Як відомо, у сильних магнетних полях енергетичний спектр носіїв заряду в напівпровіднику або в металі є квантованим, унаслідок чого густина електронних станів як функція енергії набуває осцилюючого характеру. Саме ця обставина є першопричиною виникнення осциляційних залежностей від магнетного поля ряду рівноважних і нерівноважних величин, що характеризують стан і поведінку носіїв заряду в кристалі у квантуючому магнетному полі.

У вироджених кристалах, крім осциляцій Шубнікова–де Гааза, можуть спостерігатись магнетофононні осциляції, які зумовлені непружним розсіюванням електронів на квазічастинках зі сталого частотою (фононах, плазмонах) та можуть бути й у випадку невиродженого електронного газу. Умова виникнення магнетофононних осциляцій полягає в тому, що енергія квазічастинки (наприклад, фонона) повинна дорівнювати відстані між двома будь-якими квантовими рівнями: або між двома рівнями Ландау з однаковою орієнтацією спіну (магнетофононний резонанс), або між двома рівнями з протилежною орієнтацією спіну (спін-магнетофононний резонанс) [1].

Магнетофононний резонанс (МФР), який проявляється у вигляді немонотонної залежності магнетоопору від магнетного поля в ділянці досить сильних полів, уперше виявили Гуревич і Фірсов [2, 3], досліджуючи непружне розсіювання електронів при їх взаємодії з оптичними фононами.

Коли відстань між двома будь-якими рівнями Ландау збігається з енергією оптичного фонона, тобто коли виконується резонансна умова [4],

$$M\Omega = \omega_0, \quad (1)$$

де Ω — циклотронна частота, ω_0 — гранична частота оптичних фононів, $M = 1, 2, \dots$, ймовірність розсіювання електронів зростає, і магнетоопір, який пропорційний цій залежності, проходить через максимум/мінімум. Ці осциляції можна спостерігати за умови

де $\Omega = eB/m$ — циклотронна частота, m — ефективна маса носіїв заряду, τ — час релаксації.

Варто врахувати, що в багатодолинних напівпровідниках можуть бути два типи магнетофононних переходів носіїв заряду [5] при умові (2). Перший пов'язаний з розсіюванням електрона на оптичному фононі, при цьому електрон залишається в межах цієї долини (переходи в межах долини), а другий зумовлений розсіюванням електрона на фононі з переходом з однієї долини в іншу (міждолинні переходи). Умова резонансу для переходів у межах долини має вигляд (1), де $\omega_0 = 5.65 \times 10^{13} \text{ c}^{-1}$ для Ge [4]. Умова міждолинних переходів має аналогічний вигляд, тільки замість ω_0 підставляємо ω_q — граничну частоту міждолинних переходів, $\omega_q = 4.8 \times 10^{13} \text{ c}^{-1}$ для Ge [4].

Магнетофононні осциляції поздовжнього і поперечного магнетоопору в слабологованих зразках Ge *n*- і *p*-типу вивчали в роботах [6-9]. Але немає літературних даних щодо вивчення впливу одновісної деформації на поведінку магнетофононних осциляцій магнетоопору, менш досліджували МФР в сильнолегованих зразках. Метою нашої роботи було дослідити вплив одновісної анізотропної деформації й температури на поведінку магнетофононних осциляцій поперечного й поздовжнього магнетоопору в сильнолегованих ниткоподібних кристалах (НК) Ge *n*-типу з $\rho = 0.008\text{--}0.02 \text{ Ом}\cdot\text{см}$.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Вимірювання поперечного й поздовжнього магнетоопору сильнолегованих кристалів Ge *n*-типу проводили в магнетних полях з індукцією до 14 Тл в діапазоні температур 4.2–70 К. Одновісна анізотропна деформація НК Ge в напрямку $\langle 111 \rangle$ створювалась за рахунок різниці коефіцієнтів термічного розширення германію та матеріалу підкладки, на якій закріп-

лювався мікрокристал. Методику створення одновісного механічного напруження та величини розрахованої деформації при різних температурах наведено в праці [10].

А. Поперечний магнетоопір

На рис. 1, 2 показано результати вимірювань поперечного магнетоопору як недеформованих, так і деформованих НК *n*-Ge при 4.2 К в широкому діапазоні магнетних полів з індукцією до 14 Тл. На вставках рис. 1, 2 зображено осцилюючу частину поперечного магнетоопору як залежність від оберненого магнетного поля.

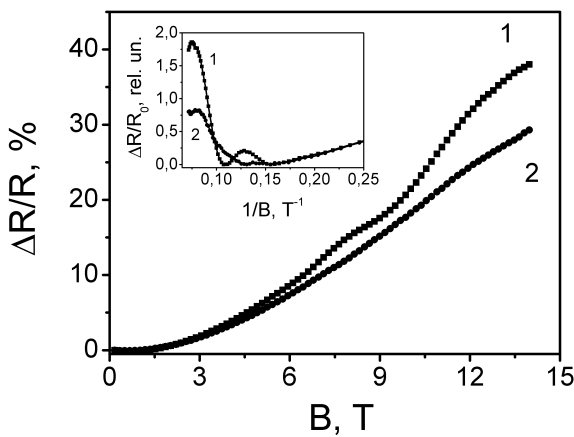


Рис. 1. Поперечний магнетоопір недеформованих НК *n*-Ge з різним питомим опором $\rho = 0.01$ (1), 0.008 (2) Ом·см при $T = 4.2$ К. На вставці: залежність магнетоопору від оберненого магнетного поля.

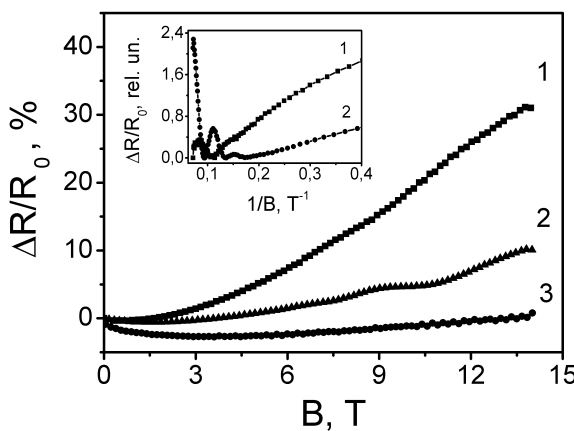


Рис. 2. Поперечний магнетоопір НК *n*-Ge з $\rho = 0.02$ Ом·см при $T = 4.2$ К: 1 — недеформований, 2 — при деформації розтягу, 3 — при деформації стиску. На вставці: залежність магнетоопору від оберненого магнетного поля.

Експериментальні дані з дослідження магнетофонних осциляцій поперечного магнетоопору в НК Ge *n*-типу з $\rho = 0.008\text{--}0.2$ Ом·см підтвердили основні висновки теорії Гуревича-Фірсова [2].

Залежності поперечного магнетоопору для НК Ge *n*-типу, які зображені на рис. 1, показують, що максимуми поперечного магнетоопору періодичні щодо оберненого поля з періодом $\Delta(1/B) = 0.04$ Тл⁻¹. Положення максимумів відповідають умові МФР для переходів електронів з рівня Ландау $N = 0$ на рівні $N = 1, 2$.

За положенням першого з боку сильних магнетних полів максимуму му $B = 12.2$ Тл при відомому значенні $\omega_0 = 4.8 \times 10^{13}$ Гц можна визначити величину ефективної маси основних носіїв заряду m^* . Обчислене значення ефективної маси електронів $m^* = 0.09m_0$ у порівнянні з ефективною масою електронів, яка визначена з вимірювань циклотронного резонансу, суттєво не відрізняється.

Як відомо [9], повинна існувати оптимальна температура, при якій осцилююча частина магнетоопору максимальна. З наведених температурних залежностей поперечного магнетоопору НК Ge (рис. 3), які виміряні в діапазоні температур 4.2–70 К, видно, що амплітуда осциляційних піків максимальна при 4.2 К, період і фаза осциляцій поперечного магнетоопору не залежать від температури.

Експериментальні вимірювання поперечного магнетоопору не виявили (важко виділити з фонового ходу кривої) магнетофонних осциляцій для недеформованого зразка (крива 1 на рис. 2). Під дією деформації розтягу з боку кварцової підкладки з'являються два помітні максимуми на кривій залежності поперечного магнетоопору (крива 2 на рис. 2). Як видно з рис. 3, на якому подано вимірювання температурної залежності магнетоопору цього ж зразка, з ростом температури величина піка зменшується і при 36 К крива є гладкою. Для зразка при деформації стиску (крива 3 на рис. 2) не було виявлено помітних відхилень від фонового ходу кривої поперечного магнетоопору в межах похибки ні при 4.2 К, ні при вищих температурах (рис. 4).

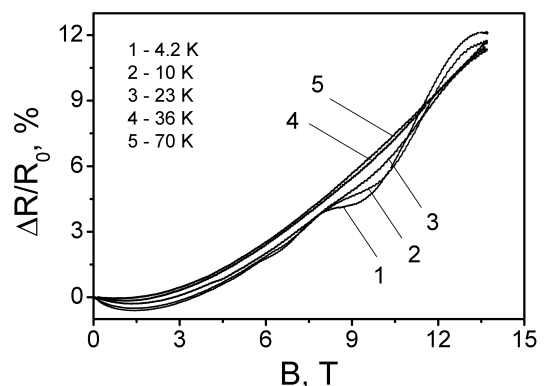


Рис. 3. Поперечний магнетоопір НК *n*-Ge з $\rho = 0.02$ Ом·см при деформації розтягу в діапазоні температур 4.2–70 К.

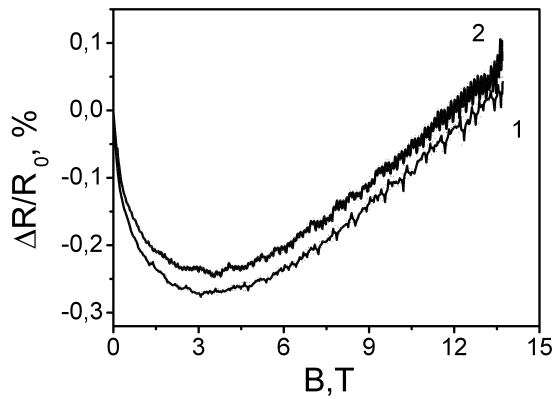


Рис. 4. Поперечний магнетоопір НК *n*-Ge з $\rho = 0.02$ Ом×см при деформації стиску при різних температурах: 1–4.2 К, 2–6 К.

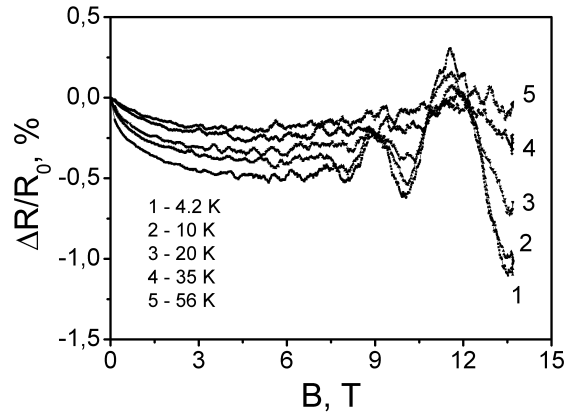


Рис. 6. Поздовжній магнетоопір НК *n*-Ge з $\rho = 0.01$ Ом×см при деформації стиску в діапазоні температур 4.2–56 К.

В. Поздовжній магнетоопір

На рис. 5, 6 показано експериментальні результати вимірювань поздовжнього магнетоопору як не деформованих, так і деформованих НК Ge *n*-типу з $\rho=0.02$ Ом×см. Як видно з рис. 5, на кривій поздовжнього магнетоопору для зразка закріпленого на алюмінієвій підкладці (крива 3 на рис. 5), виявлено 3 мінімуми, які періодичні щодо оберненого поля з періодом $\Delta(1/B) = 0.025$ Тл⁻¹.

На кривих поздовжнього магнетоопору НК Ge як недеформованого, так і при деформації розтягу не було виявлено помітних відхилень від фонового ходу кривих (криві 1, 2 на рис. 5). Як видно із залежностей поздовжнього магнетоопору для НК Ge, при деформації стиску вимірюваних при різних температурах, максимальна глибина мінімумів спостерігається при температурі 4.2 К і з підвищенням температури їх глибина зменшується.

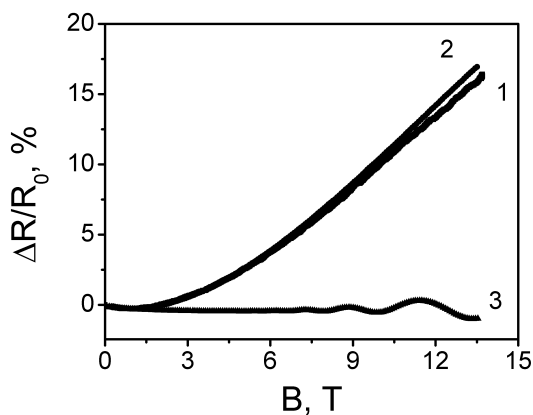


Рис. 5. Поздовжній магнетоопір НК *n*-Ge з $\rho = 0.01$ Ом×см при 4.2 К: 1 — недеформований, 2 — при деформації розтягу, 3 — при деформації стиску.

Як видно з рис. 2 і 5, вплив деформації на величину амплітуди осциляцій магнетоопору є неоднозначним. Осциляції поперечного магнетоопору спостерігались лише при деформації розтягу, а при деформації стиску були виявлені осциляції лише поздовжнього магнетоопору. На нашу думку, такий неоднозначний вплив деформації на величину осциляційних піків зумовлений зміною енергетичного спектра носіїв заряду. При накладанні одновісної деформації змінюється енергія активації, виникає розщеплення вироджених зон або еквівалентних долин енергії в багатодолинних напівпровідниках, змінюються енергетичні щілини між нееквівалентними долинами, ширина забороненої зони.

Як показують експериментальні результати, величина й напрям накладеного магнетного поля та величина і знак прикладеного одновісного механічного напруження, а також температура є факторами, з допомогою яких можна керувати величиною амплітуди осциляцій магнетоопору.

ВИСНОВКИ

Виявлено та експериментально досліджено магнетофононні осциляції поздовжнього та поперечного магнетоопору в НК Ge *n*-типу в діапазоні температур 4.2–70 К. Установлено, що осциляції зумовлені міждолинним резонансним розсіюванням електронів. Проаналізовано вплив одновісної анізотропної деформації та температури на величину осциляційних піків. На основі результатів досліджень магнетофононних осциляцій поперечного магнетоопору розраховано величину ефективної маси електронів, яка становить $m^* = 0.09m_0$ і суттєво не відрізняється від відомих літературних даних.

- [1] И. М. Цидильковский, *Зонная структура полупроводников* (Наука, Москва, 1978).
- [2] В. Л. Гуревич, Ю. А. Фирсов, *Журн. эксп. теор. физ.* **40**, 199 (1961).
- [3] Ю. А. Фирсов, В. Л. Гуревич, *Журн. эксп. теор. физ.* **41**, 512 (1961).
- [4] Р. В. Парфеньев, Г. И. Харус, И. М. Цидильковский, С. С. Шалыт, *Усп. физ. наук* **112**, 3 (1974).
- [5] Н. Г. Глузман, И. М. Цидильковский, *Физ. тверд. тела* **10**, 3128 (1968).
- [6] В. И. Соколов, И. М. Цидильковский, *Физ. техн. полупр.* **1**, 855 (1967).
- [7] Н. Г. Глузман, В. Э. Любимов, И. М. Цидильковский, *Физ. техн. полупр.* **7**, 1000 (1973).
- [8] L. Eaves, R. A. Hoult, R. A. Stradling, R. J. Tidey, J. C. Portal, S. Askenazy, *J. Phys. C: Solid State Phys.* **8**, 1034 (1975).
- [9] L. Eaves, R. A. Hoult, R. A. Stradling, S. Askenazy, R. Barbaste, G. Carrere, J. Leotin, J. C. Portal, J. P. Ulmet, *J. Phys. C: Solid State Phys.* **10**, 2831 (1977).
- [10] A. Druzhinin, I. Hortynska, I. Maryamova, E. Lavitska, M. Oszwaldowski, *Proc. SPIE* **4413**, 143 (2001).

MAGNETOPHONON RESONANCE IN *n*-Ge WHISKERS

A. Druzhinin, I. Pavlovsky

Lviv Polytechnic National University, Scientific-Research Center "Crystal"

Magnetophonon oscillations of transversal and longitudinal magnetoresistance in doped Ge *n*-type whiskers were experimentally studied in the temperatures range 4.2–70 K in the magnetic fields up to 14 T. Oscillations were caused by intervalley resonant scattering of electrons. It was shown that the position and amplitude of oscillations peaks strongly depend on the temperature and strain. From experimental data the effective mass of the electron was calculated.