

МАГНЕТОФОНОННІ ОСЦИЛЯЦІЇ ПОПЕРЕЧНОГО ТА ПОЗДОВЖНЬОГО МАГНЕТООПОРУ НИТКОПОДІБНИХ КРИСТАЛІВ Ge

Експериментальна досліджено магнетофононні осциляції поперечного і поздовжнього магнетоопору в сильнолегованих ниткоподібних кристалах (НК) Ge n- і p-типу провідності в діапазоні температур 4,2-70 K в магнетних полях з індукцією до 14 Тл, а також: вплив деформації та температури на амплітуду і положення осциляційних піків. З експериментальних даних розраховано ефективну масу носіїв заряду.

Вступ

Як відомо [1], енергетичний спектр носіїв заряду в напівпровіднику або в металі в сильних магнетних полях піддається квантуванню, внаслідок чого густина електронних станів як функція енергії набуває осциляційного характеру. Це і 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.

Вперше магнетофононний резонанс (МФР), який проявляється у вигляді немонотонної залежності магнетоопору від магнетного поля в області достатньо сильних полів, виявили В. Л. Гуревич і Ю. О. Фірсов [2, 3] під час дослідження непружного розсіювання електронів у разі їх взаємодії з оптичними фононами.

Магнетофононні осциляції магнетоопору зумовлені непружним розсіюванням носіїв заряду на квазічастинках з постійною частотою (на фононах, плазмонах). Магнетофононні осциляції на відміну від осциляцій Шубнікова - де Гааза, які мають місце тільки у вироджених напівпровідниках, можуть спостерігатись як у випадку виродженого, так і не виродженого газу носіїв заряду. Умова виникнення магнетофононних осциляцій полягає в тому, що енергія квазічастинки (наприклад, фонона) має 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].

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 носіїв заряду зростає, і магнетопір, пропорційний цій залежності, проходить через максимум або мінімум. Ці осциляції можна спостерігати за умови

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

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

Варто врахувати, що в багатодолинних напівпровідниках можуть мати місце два типи магнетофононних переходів носіїв заряду [5] за умови (2). Перший пов'язаний з розсіюванням носіїв заряду на оптичних фононах, при цьому носії заряду залишаються в межах даної долини (переходи в межах долини), а другий зумовлений розсіюванням носіїв заряду на фононах з переходом з однієї долини в іншу (міждолинні переходи). Умова резонансу для переходів в межах долини має вигляд (1), де $\omega_0 = 5,65 \cdot 10^{13} \text{ c}^{-1}$ 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 слабколегованих зразках Ge n- і p-типу вивчалися у працях [6-9], однак відсутні відомості щодо вивчення впливу одновісної деформації на поведінку магнетофононних осциляцій, менш дослідженим є МФР в сильнолегованому Ge. Метою цієї роботи було дослідження впливу одновісного механічного напруження і температури на поведінку магнетофононних осциляцій поперечного і поздовжнього магнетоопору в сильнолегованих ниткоподібних кристалах Ge n- і p-типу провідності.

Експериментальні результати та їх обговорення

НК Ge вирощувались методом хімічних транспортних реакцій з газової фази в закритій системі у формі гексагональних призм з поздовжньою віссю в кристалографічному напрямку [111] та діаметром 10-60 мкм. Мікрочастинки Ge *n*-типу провідності під час росту легували Sb, а *p*-типу - Ga. Як ініціатори росту вводились домішки золота і платини. Усі зразки були слабокомпенсовані ($k < 0,01$). Електричні контакти та струмовиводи до них створювались імпульсним зварюванням срібного мікродроду з мікрочастинкою; контакти були омичними в усьому діапазоні досліджуваних температур. Однорізне механічне напруження НК Ge створювалось шляхом закріплення мікрочастинки на підкладці за рахунок різниці коефіцієнтів термічного розширення Ge та матеріалу підкладки. Методику створення однорізного механічного напруження та величини розрахованої деформації за різних температур наведено у працях [10, 11]. Зокрема, підкладки з кварцу і алюмінію, на яких закріплювались мікрочастинки, забезпечували деформацію розтягу $\epsilon = 1,37 \cdot 10^{-3}$ відн. од. і деформацію стиску $\epsilon = -4,38 \cdot 10^{-3}$ відн. од. при 4,2 К.

Вимірювання поперечного і поздовжнього магнетопору сильнолегованих НК Ge *n*- і *p*-типу з $\rho_{300\text{ K}} = 0,0008 \div 0,002 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ проводили на біттерівському магнеті в полях з індукцією до 14 Тл в діапазоні температур 4,2-70 К.

На рис. 1, 2 зображено результати вимірювань поперечного магнетопору як недеформованих (вільних), так і деформованих (закріплених на підкладках) НК *n*-Ge при $T = 4,2 \text{ К}$ в широкому діапазоні магнетних полів з індукцією до 14 Тл.

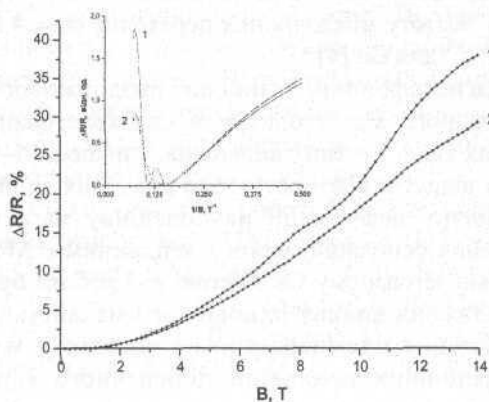


Рис. 1. Поперечний магнетопір недеформованих (вільних) НК *n*-Ge при 4,2 К з питомим опором $\rho_{300\text{ K}}$ 1 - 0,001; 2 - 0,0008 Ом·см

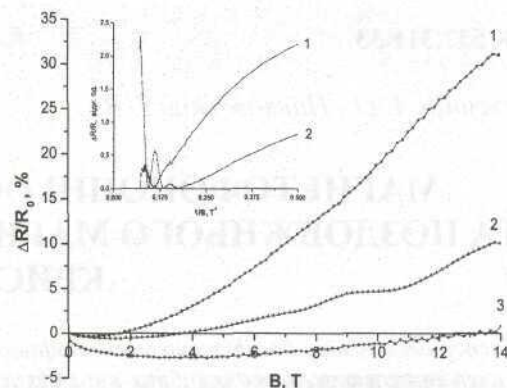


Рис. 2. Поперечний магнетопір НК *n*-Ge при 4,2 К з $\rho_{300\text{ K}} = 0,002 \text{ Ом} \cdot \text{см}$: 1 - недеформований; 2 - у разі деформації розтягу $\epsilon = 1,37 \cdot 10^{-3}$ відн. од.; 3 - за деформації стиску $\epsilon = -4,38 \cdot 10^{-3}$ відн. од. (значення магнетопору збільшено в 10 разів)

На залежностях поперечного магнетопору для НК Ge *n*-типу (рис. 1) виявлено два максимуми, періодичні відносно оберненого поля з періодом $\Delta(1/B) = 0,04 \text{ Тл}^{-1}$ (рис. 1, вставка). Положення максимумів відповідають умові МФР для переходу електронів з рівня Ландау $N = 0$ на рівні $N = 1, 2$. За положенням першого максимуму з боку сильних магнетних полів при відомому значенні граничної частоти оптичних фонових визначено величину ефективної маси основних носіїв заряду m^* . Обчислене значення ефективної маси електронів $m^* = 0,09 m_0$ суттєво не відрізняється від ефективної маси електронів, що визначена з вимірювань циклотронного резонансу [12].

Як відомо [9], має існувати оптимальна температура, за якої осциляційна частина магнетопору є максимальною. З наведених на рис. 3 температурних залежностей поперечного магнетопору НК *n*-Ge бачимо, що амплітуда осци-

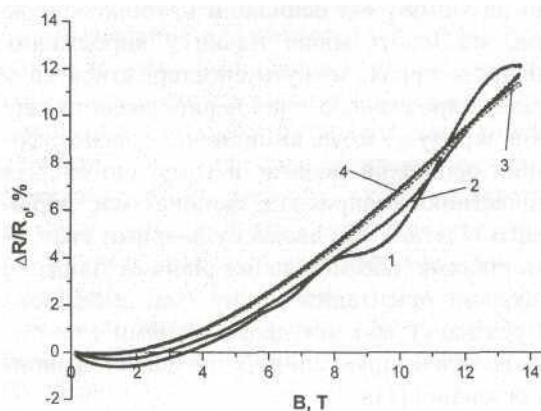


Рис. 3. Температурні залежності поперечного магнетопору НК *n*-Ge з $\rho_{300\text{ K}} = 0,002 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ за деформації розтягу: 1 - 4,2 К; 2 - 23 К; 3 - 50 К; 4 - 70 К

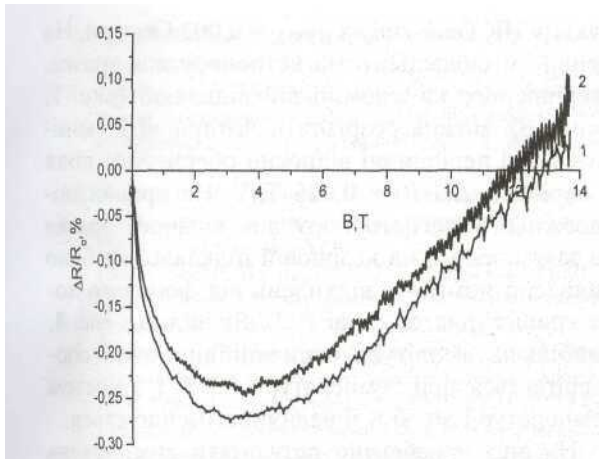


Рис. 4. Температурні залежності поперечного магнетоопору НК n-Ge з $\rho_{300\text{K}} = 0,002 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ за деформації стиску: 1 - 4,2 К; 2 - 6 К

ляційних піків максимальна при 4,2 К, а період і фаза осциляцій поперечного магнетоопору не залежать від температури. Вимірювання поперечного магнетоопору не виявили (важко виділити з фонового ходу кривої) магнетофононні осциляції для недеформованого зразка (рис. 2, крива 7). Під дією деформації розтягу з боку кварцової підкладки з'являються два помітних максимуми на кривій залежності поперечного магнетоопору (рис. 2, крива 2). Як бачимо з рис. 3, на якому зображено результати вимірювання температурної залежності магнетоопору цього ж зразка, з ростом температури величина піка зменшується і при 36 К крива є монотонною. Для зразка, закріпленого на алюмінієвій підкладці (рис. 2, крива 3), не було виявлено помітних відхилень від фонового ходу кривої поперечного магнетоопору в межах похибки ані за 4,2 К, ані за вищих температур (рис. 4).

Аналогічні дослідження також було проведено для НК Ge p-типу з $\rho_{300\text{K}} = 0,002 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ як вільних, так і деформованих. Для вільного зразка було виявлено помітні відхилення від фонового ходу кривої поперечного магнетоопору (рис. 5, крива 7), а для зразка, закріпленого на алюмінієвій підкладці, не було виявлено осциляційних піків (рис. 5) ні за гелієвої температури, ні за вищих температур. З ростом температури від 4,2 К до 69 К амплітуда осциляцій поперечного магнетоопору вільного зразка зменшується, і вже при 55 К не було виявлено осциляційних піків (рис. 6). На основі експериментальних даних за формулою (1) було розраховано ефективну масу легких дірок, значення якої $m = 0,041m_0$ дуже близьке до відомих з літератури даних [12].

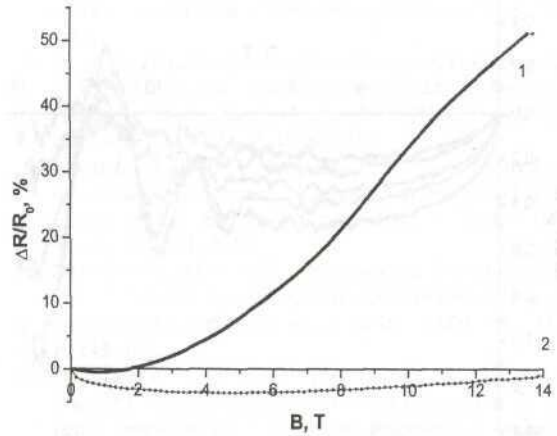


Рис. 5. Поперечний магнетоопір НКp-Ge при $T=4,2 \text{ К}$ з $\rho_{300\text{K}}=0,002 \text{ Ом} \cdot \text{см}$: / - недеформований; 2 - за деформації стиску $\epsilon = -4,38 \cdot 10^{-3}$ відн. од. (значення магнетоопору збільшено в 10 разів)

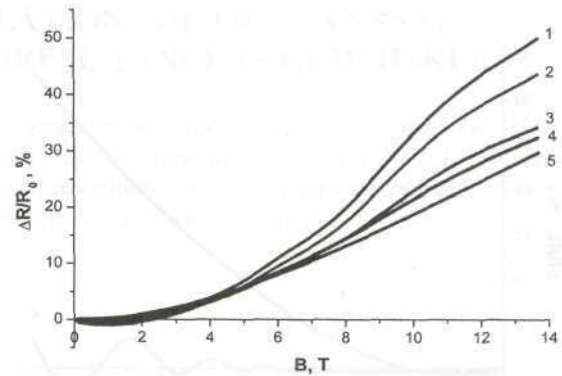


Рис. 6. Температурні залежності поперечного магнетоопору недеформованого зразка НК p-Ge з $\rho_{300\text{K}}=0,002 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ (уК): / -4,2; 2 -6; 3- 12; 4-22; 5 -69

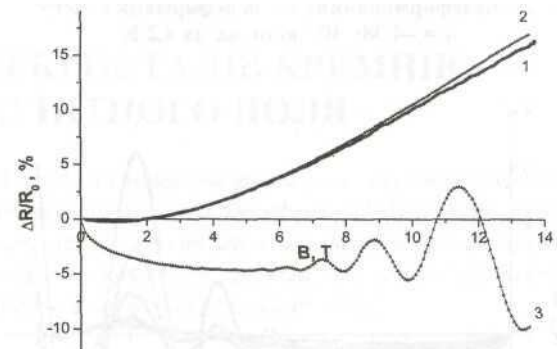


Рис. 7. Поздовжній магнетоопір НК n-Ge з $\rho_{300\text{K}} = 0,002 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ при $T = 4,2 \text{ К}$: 1 - недеформований; 2 - за деформації розтягу $\epsilon = 1,37 \cdot 10^{-3}$ відн. од.; 3 - за деформації стиску $\epsilon = -4,38 \cdot 10^{-3}$ відн. од. (значення магнетоопору збільшено в 10 разів)

На рис. 7 наведено експериментальні результати вимірювань поздовжнього магнетоопору як деформованих, так і недеформованих

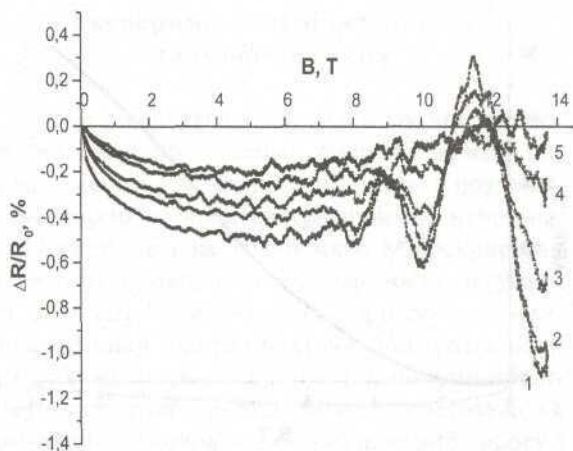


Рис. 8. Температурні залежності поздовжнього магнетоопору НК *n*-Ge з $\rho_{300\text{K}} = 0,002 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ за деформації стиску (γ K):
1 – 4,2; 2 – 10; 3 – 20; 4 – 35; 5 – 56

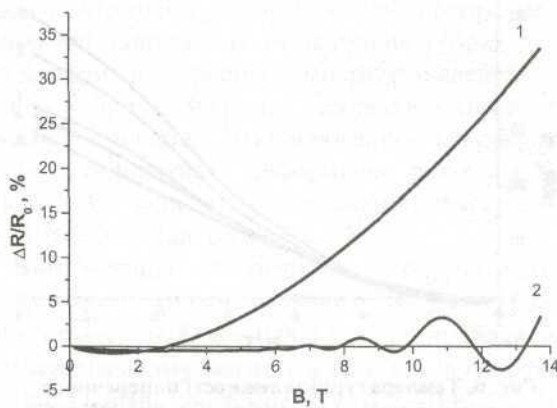


Рис. 9. Поздовжній магнетоопір НК Ge *p*-типу з $\rho_{300\text{K}} = 0,002 \text{ Ом}\cdot\text{см}$:
1 – недеформований; 2 – за деформації стиску $\epsilon = -4,38 \cdot 10^{-3}$ відн. од. за 4,2 K

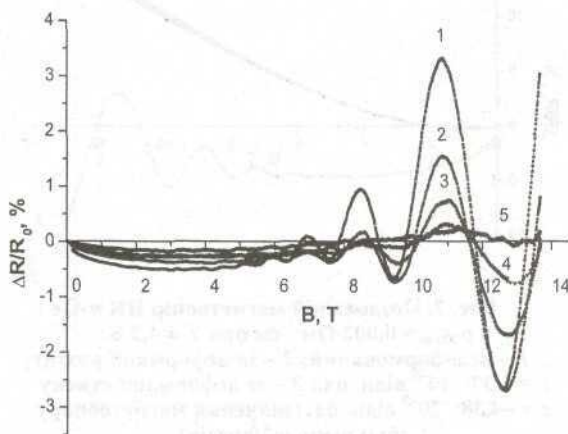


Рис. 10. Температурні залежності поздовжнього магнетоопору НК Ge *p*-типу з $\rho_{300\text{K}} = 0,002 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ за деформації стиску (γ K):
1 – 4,2; 2 – 12; 3 – 22; 4 – 35; 5 – 54

зразків НК Ge η -типу з $\rho_{300\text{K}} = 0,002 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. На кривій поздовжнього магнетоопору для зразка, закріпленого на алюмінієвій підкладці (рис. 7, крива 3), можна розрізнити чотири чіткі мінімуми, які періодичні відносно оберненого поля з періодом $\Delta(1/B) = 0,025 \text{ Тл}^{-1}$. На кривих поздовжнього магнетоопору для вільного зразка та закріпленого на кварцовій підкладці не було виявлено помітних відхилень від фонового ходу кривих (рис. 5, криві 1, 2). Як видно з рис. 8, найбільша амплітуда осциляційних піків спостерігається при температурі 4,2 K і з ростом температури до 56 K її величина зменшується.

На рис. 9 наведено результати вимірювань поздовжнього магнетоопору НК Ge *p*-типу провідності з $\rho_{300\text{K}} = 0,002 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ як для недеформованих, так і деформованих зразків. На польовій залежності поперечного магнетоопору для зразка НК Ge *p*-типу, що закріплений на алюмінієвій підкладці, було виявлено чотири мінімуми, періодичні відносно оберненого поля з періодом $\Delta(1/B) = 0,026 \pm 0,001 \text{ Тл}^{-1}$ (рис. 9, крива 2).

Як показали дослідження температурних залежностей поздовжнього магнетоопору для цього ж зразка, з ростом температури від 4,2 до 54 K амплітуда осциляційних піків зменшується, але їх положення не змінюється (рис. 10).

За експериментальними результатами осциляції поздовжнього магнетоопору спостерігаються тільки на зразках НК Ge *n*- і *p*-типу за деформації стиску. А в разі поперечного магнетного поля осциляції магнетоопору було виявлено як для деформованих (деформація розтягу), так і недеформованих НК Ge η -типу, а для НК Ge *p*-типу - тільки для недеформованих зразків.

Висновки

Виявлено магнетофононні осциляції поздовжнього та поперечного магнетоопору в НК Ge *n*- і *p*-типу в діапазоні температур 4,2-70 K. Встановлено, що осциляції зумовлені міждоліним резонансним розсіюванням носіїв заряду. Як показали експериментальні дослідження, значення і знак прикладеного одновісного механічного напруження поряд зі значеннями магнетного поля та температури є визначальними факторами, за допомогою яких можна керувати амплітудою магнетофононних осциляцій. Розраховано значення ефективних мас електронів та легких дірок на основі результатів досліджень магнетофононних осциляцій поперечного магнетоопору НК Ge *n*- і *p*-типу провідності.

1. Цидильковский И. М. Зонная структура полупроводников.-М.: Наука, 1978.-328 с.
2. Гуревич В. Л., Фирсов Ю. А. К теории электропроводности полупроводников в магнитном поле // Журн. эксперимент, и теор. физики.- 1961.- Т. 40.- С. 199-213.
3. Фирсов Ю. А., Гуревич В. Л. К теории электропроводности полупроводников в магнитном поле // Там же.- 1961.-Т, 41.-С. 512-523.
4. Парфеньев Р. В., Харус Г. И., Цидильковский И. М., Шалыт С. С. Магнитофонный резонанс в полупроводниках // Успехи физ. наук.- 1974.- Т. 112.- С. 3-36.
5. Глузман Н. Г., Цидильковский И. М. Магнитофонные осцилляции поперечного магнетосопротивления в n-Ge // Физика тверд, тела,- 1968-Т. 10-С. 3128-3130.
6. Соколов В. И., Цидильковский И. М. Магнитофонные осцилляции продольного магнетосопротивления в n-Ge // Физика и техника полупроводников.- 1967.- Т. 1.- С. 835-837.
7. Глузман Н. Г., Любимов В. Э., Цидильковский И. М. Магнитофонные осцилляции продольного магнетосопротивления n-Ge II Там само.- 1973- Т. 7- С. 1000-1001.
8. Eaves L., Hoult R. A., Stradling R. A. et al. Fourier analysis of magnetophonon and two-dimensional Shubnikov-de Haas magnetoresistance structure // J. Phys. C: Solid State Phys.- 1975.- V. 8.-P. 1034-1053.
9. Eaves L., Hoult R. A., Stradling R. A. et al. An investigation of the valence bands of germanium, InSb and GaAs by means of the magnetophonon effect // Ibid.- 1977.- V. 10.-P. 2831-2848.
10. Druzhinin A., Hortynska /., Maryamova I. et al. Investigation of free and strained germanium whiskers at cryogenic temperatures // Proceedings of SPIE.- 2001.- V. 4413.- p. 143-147.
11. Druzhinin A., Lavitska E., Maryamova /., Kunert H. Stress imposing during microcrystals characterization at cryogenic temperatures // Advanced Engineering Materials.- 2002.- V. 4.- P. 589-592.
12. Баранский П. И., Клочков В. П., Потыкевич И. В. Полупроводниковая электроника:Справочник.-К.:Наук, думка, 1975.-704 с.

A. Druzhinin, I. Pavlovsky

MAGNETOPHONONE OSCILLATIONS OF TRANSVERSAL AND LONGITUDINAL MAGNETORESISTANCE IN Ge WHISKERS

Magnetophonone oscillations of transversal and longitudinal magnetoresistance in doped Ge whiskers n- and p-type conductivity were experimentally investigated in the temperatures range 4.2-70 K in magnetic fields up to 14 T. Influence of strain and temperatures on amplitude and position peaks of oscillation were investigated. From experimental data the effective mass of carriers charge was calculated.