

В.М. БОНДАР, О.С. ПИЛИПЧУК, В.В. БОНДАРЕНКО

Інститут фізики НАН України  
(Просп. Науки 46, Київ 03028)**ВПЛИВ СЛАБКОГО МАГНІТНОГО  
ПОЛЯ НА ПАРАМЕТРИ ТЕРАГЕРЦОВОГО  
ВИПРОМІНЮВАННЯ В ОКОЛІ 100 мкм  
ГАРЯЧИМИ НОСІЯМИ З *p*-Ge**

УДК 539

*У роботі наведено експериментальні результати вимірювання впливу слабого магнітного поля на поляризаційні характеристики терагерцового випромінювання в околі 100 мкм гарячих носіїв у *p*-Ge для зразків кристалографічного напрямку (111) і (100) при температурі 5 К і розігріваних електричних полях до 300–600 В/см.*

*Ключові слова:* слабе магнітне поле, терагерцове випромінювання, *p*-Ge.

У роботі [1] досліджувався вплив слабого магнітного поля (СМП) на поляризаційні характеристики випромінювання ( $\sim 100$  мкм) гарячими носіями з *n*-Ge при температурі 5 К. За “слабке” магнітне поле ми вважаємо таке поле  $H$ , у якому  $\hbar\omega_c \ll kT$ ,  $\omega_c\tau \ll 1$  і  $g_e\mu_B H \ll kT$ , де  $\omega_c = eH/m^*c$  – циклотронна частота,  $k$ ,  $\mu_B$ ,  $e$  і  $c$  – стала Больцмана, магнетон Бора, заряд електрона і швидкість світла, відповідно, а  $\tau$  – час розсіяння носіїв заряду за імпульсом. Було помічено, що завдяки впливу такого поля інтенсивність ТГЦ-випромінювання зменшується майже в десять разів. Також було експериментально зафіксовано, що поляризаційні залежності (зміна інтенсивності випромінювання від кута повороту поляризатора) існують не лише для зразків *n*-Ge кристалографічного напрямку (111) (коли гріюче електричне поле викликає нерівномірне заселення долин), а і у випадку (100), коли всі долини заселені однаково. Такі результати були незрозумілими і вимагали пояснення.

П.М. Томчук показав, що описати ці явища не можна в традиційному дифузійному наближенні, коли у розкладі функції розподілу враховуються

лише два перших члени. Він запропонував складніший підхід, коли у розкладі функції розподілу враховується третій член, що несе інформацію про більш тонкі характеристики випромінювання. Цьому явищу було дано пояснення і проведено теоретичні дослідження та оціночні розрахунки, що задовільно збігалися з експериментальними даними. В зв'язку з цим становило інтерес перевірити існування подібних поляризаційних залежностей на *p*-Ge, напівпровіднику, що характеризується складною зонною структурою і де незначна кількість легких дірок (2%) при їх розігріві зумовлює їх суттєвий вплив на електричні властивості.

По аналогії з попередніми дослідженнями на *n*-Ge був вибраний високоомний *p*-Ge різних виробників з однією загальною рисою: питомий опір 45 Ом·см. Зразки виготовлялися за відпрацьованою технологією [1] і мали розміри по довжині 7 мм з поперечним перерізом  $1 \times 1$  мм<sup>2</sup>. Частина зразків була орієнтована по довгому розміру в кристалографічному напрямку (111) (рис. 1, 2, 3, 4), частина – в (100) (рис. 5). При вимірах фіксувалась залежність між глибиною поляризації сигналу випромінювання, його зсувом по шкалі абсцис, зміною інтенсивності під дією поперечного чи поздовжнього СМП з напруженістю 300 Гс, для

© В.М. БОНДАР, О.С. ПИЛИПЧУК,  
В.В. БОНДАРЕНКО, 2014

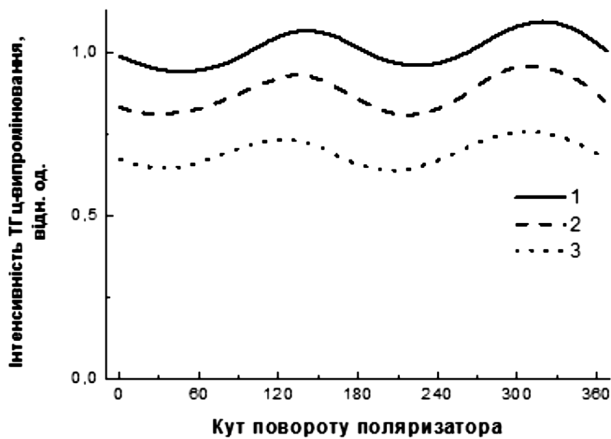


Рис. 1. Поляризаційна залежність ТГц сигналу випромінювання гарячих носіїв з *p*-Ge 45 Ом·см, кристалографічний напрямок зразків – (111): 1 – без СМП, 2 – СМП паралельне струму, 3 – СМП перпендикулярне до струму. Напруженість гріючого електричного поля 9 В/см. Температура вимірювання скрізь 5 К

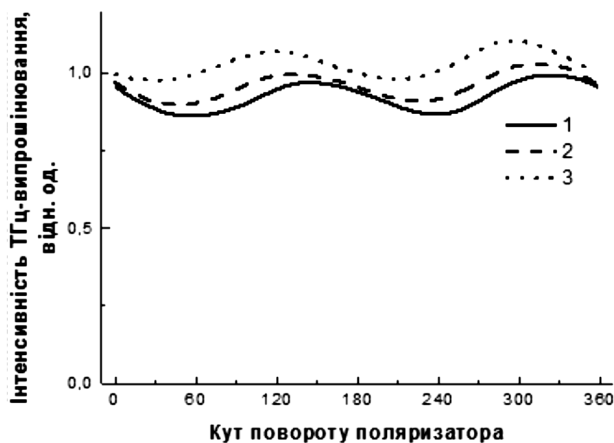


Рис. 2. Поляризаційна залежність ТГц-випромінювання гарячих носіїв з *p*-Ge 45 Ом·см, кристалографічний напрямок зразка – (111): 1 – без СМП, 2 – СМП паралельне до струму, 3 – СМП перпендикулярне до струму. Напруженість гріючого електричного поля 20 В/см

якого у *p*-Ge при  $T \geq 5$  К наведені вище критерії слабкості поля виконуються, та розігріваючого електричного поля. Враховувався також кристалографічний напрямок зразка по його великому розміру: на рис. 1, 2, 3, 4 – це напрямок (111), на рис. 5 – (100). Послідовність вимірів була такою: фіксувалась амплітуда у максимумі поляризаційної залежності без СМП, потім вводилося СМП і відзначалась зміна рівня сигналу (зниження або

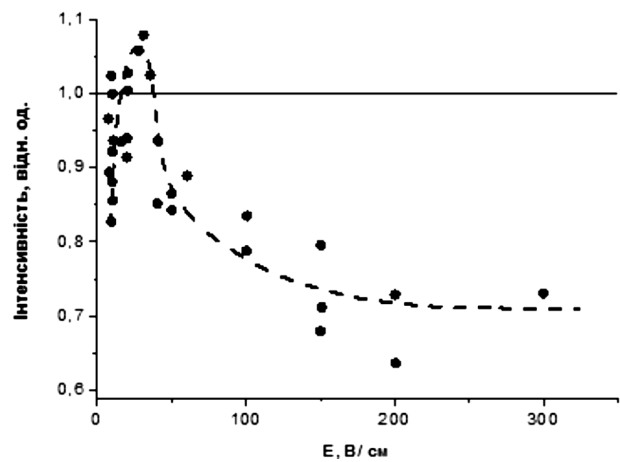


Рис. 3. Залежність відносної інтенсивності ТГц-випромінювання з *p*-Ge 45 Ом·см від гріючого електричного поля у прикладеному СМП. Кристалографічний напрямок зразка (111). СМП паралельне до струму. За 100% інтенсивності прийнята інтенсивність ТГц-випромінювання без СМП

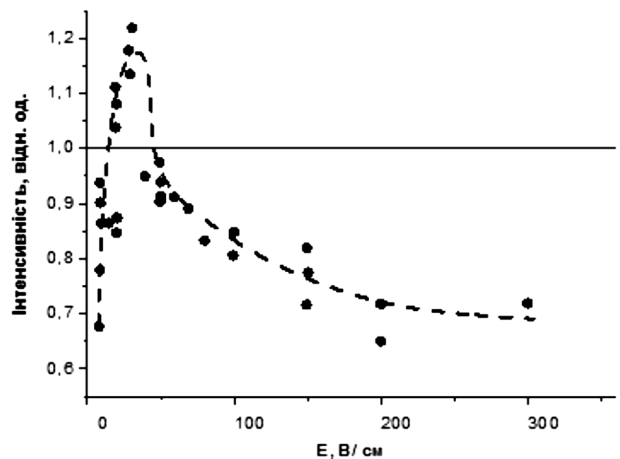


Рис. 4. Залежність відносної інтенсивності ТГц-випромінювання з *p*-Ge 45 Ом·см від гріючого електричного поля у прикладеному СМП. Кристалографічний напрямок зразка (111). СМП перпендикулярне до струму. За 100% інтенсивності прийнята інтенсивність ТГц-випромінювання без СМП

підвищення) відносно максимального сигналу без СМП. Детальні характеристики вимірювання наведені у підписах до рисунків. Усі дослідження проводилися при температурі  $T$  5 К. Відзначимо, що СМП, паралельне до осі зразка (поздовжнє), діє слабше на ТГц-випромінювання. СМП, що спрямоване перпендикулярно до осі зразка (перпендикулярне напрямку (111)), діє значно сильні-

ше. Зазначимо, що кожна точка на графіках на рис. 3, 4, 5 – це два проходи поляризаційної залежності ТГЦ-випромінювання. З наведених результатів видно, що залежно від величини гріючого електричного поля спостерігається більший чи менший фазовий зсув кривих (рис. 1 і 2), причому при малих гріючих електричних полях вплив СМП у процентному відношенні значно сильніший, ніж у великих (150, 300, 600 В/см) електричних полях.

Для пояснення впливу СМП на фазовий зсув і амплітуду ТГЦ-випромінювання гарячими носіями з *p*-Ge необхідно було б провести оцінки з врахуванням особливостей зонної структури, впливу на неї СМП, ролі легких і тяжких дірок, збільшення кількості легких дірок при розігріві носіїв електричним полем, переходу дірок в третю зону, розташовану нижче перших двох на 0,29 eV і т.д. Завдання надзвичайно складне, і тому ми наводимо лише експериментальні факти, і можемо висловити деякі припущення відносно тих залежностей, що спостерігаються експериментально. Окрім фазового зсуву поляризаційних характеристик ТГЦ-випромінювання під дією СМП були зафіксовані ще такі характерні риси:

1. При малих електричних полях (7–20 В/см) для зразків кристалографічного напрямку (111) СМП викликає суттєве зменшення амплітуди поляризаційного сигналу у порівнянні з амплітудою без СМП (умовно назвемо це “негативним” впливом СМП) рис. 3 і 4. З подальшим ростом гріючого електричного поля з 20 до 30 В/см спостерігається зростання інтенсивності поляризаційного сигналу (“позитивний” вплив СМП), потім знову – “негативний”.

2. Для зразків кристалографічного напрямку (100) хід згаданих вище залежностей якісно інший: після зростання інтенсивності ТГЦ-випромінювання (при 20 В/см вплив СМП залишається “позитивним” до 600 В/см (хоча і зменшується по абсолютній величині)).

3. Найбільший вплив на фазовий зсув кривих поляризації ТГЦ-випромінювання і його інтенсивність має СМП, що спрямоване перпендикулярно гріючому електричному полю.

В літературі нам не вдалося знайти робіт, які б стосувалися впливу СМП на ТГЦ-випромінювання гарячими носіями з *p*-Ge. Оскільки СМП впливає на опір зразка (явище магнетоопору, [7]), то потрібно шукати зв'язок між інтенсивністю ТГЦ-

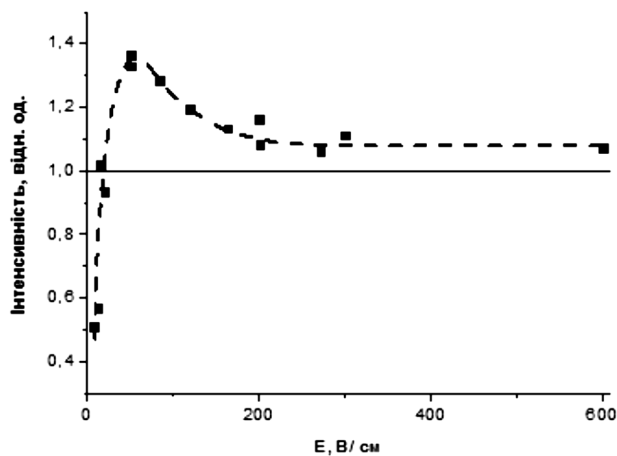


Рис. 5. Залежність відносної інтенсивності ТГЦ-випромінювання з *p*-Ge 45 Ом·см від гріючого електричного поля у прикладеному СМП. Кристалографічний напрямок зразка (100). СМП паралельне до струму. За 100% інтенсивності прийнята інтенсивність ТГЦ-випромінювання без СМП

випромінювання і магнетоопором. Але складність полягає в тому, що магнетоопір *p*-Ge, в основному, вивчався в умовах слабких електричних полів (1–2 В/см), коли розігріву носіїв немає, та в області магнітних полів до 7–9 Тл, де проявляються сильні залежності від кристалографічного напрямку [2–5] при слабких електричних полях. Наші ж виміри стосуються слабких магнітних полів і сильних електричних (до 600 В/см), де маємо дуже складну картину тривалентних зон [6], що пов'язані між собою, і цей зв'язок змінюється в процесі розігріву носіїв.

*Висловлюємо подяку П.М. Томчуку за постійну увагу до цієї роботи, С.М. Рябченку за його поради при її обговоренні та М.М. Кулику за допомогу у магнітних вимірах.*

1. V.M. Bondar, P.M. Tomchuk, and G.A. Shepelskii, *Phys. Status Solidi B* **250**, 344 (2013).
2. H. Fritzsche and M. Cuevas, *Phys. Rev.* **119**, 1238 (1960).
3. W.W.-v. Lee and R.Y. Sladek, *Phys. Rev.* **158**, 794 (1967).
4. А.Р. Гаджиев, И.С. Шлимак, *ФТП* **6**, 1582 (1972).
5. J. Chroboczek, A. Klokocki, and K. Kopalko, *Physica C* **7**, 3042 (1974).
6. Э. Конуел, *Кинетические свойства полупроводников в сильных электрических полях* (Мир, Москва, 1970).
7. Б.И. Шкловский, А.Л. Эфрос, *Электронные свойства легированных полупроводников* (Наука, Москва, 1979).

Одержано 21.01.14

*В.М. Бондар, А.С. Пилипчук, В.В. Бондаренко*

ВЛИЯНИЕ СЛАБОГО МАГНИТНОГО  
ПОЛЯ НА ПАРАМЕТРЫ ТЕРАГЕРЦЕВОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ ( $\sim 100$  мкм) ГОРЯЧИМИ  
НОСИТЕЛЯМИ С *p*-Ge

Резюме

В работе приводятся экспериментальные результаты влияния слабого магнитного поля на поляризационные характеристики терагерцевого излучения в окрестности  $\sim 100$  мкм горячих носителей из *p*-Ge для образцов кристаллографического направления (111) и (100) при температуре 5 К и разогревающим электрическом поле 300–600 В/см.

*V.N. Bondar, A.S. Pylipchuk, V.V. Bondarenko*

EFFECT OF WEAK MAGNETIC FIELD  
ON THE PARAMETERS OF TERAHERTZ  
RADIATION EMITTED BY HOT  
CARRIERS IN *p*-Ge

Summary

Experimental results are reported on the influence of a weak magnetic field on the intensity and the polarization of a terahertz radiation ( $\sim 100$   $\mu\text{m}$ ) emitted by hot carriers in *p*-Ge specimens with the (111) or (100) crystallographic direction at a temperature of 5 K and heating electric fields of 300–600 V/cm.