ТЕМПЕРАТУРНІ ЗАЛЕЖНОСТІ ПОЛЯРИЗАЦІЇ ТЕРАГЕРЦОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ГЕРМАНІЮ n-ТИПУ У ГРІЮЧИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛЯХ В ОБЛАСТІ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР

В.М. БОНДАР, П.М. ТОМЧУК

Інститут фізики НАН України
(Просп. Науки, 46, Київ 03680; e-mail: ptomchuk@iop.kiev.ua)

УДК 538.958
©2010

Як було відзначено в роботі [3] для правомірності припущення про те, що хід поляризаційних залежностей терагерцового випромінювання гарячими електронами з n-Ge визначається типом розсіювання носіїв, необхідно провести температурні виміри цієї залежності від температур, де превалює розсіювання на домішках, до температур, де превалює розсіювання на акустичних коливаннях ґратки. У даній роботі наведено результати таких досліджень.

1. Вступ

Терагерцове випромінювання гарячими носіями з n-Ge, як зазначалось в [1–3], має специфічну характеристику – воно поляризоване. Поляризаційні залежності як функції кута між вектором поляризації і напрямком гріючого поля носять періодичний характер. Положення максимумів і мінімумів цих залежностей можуть змінюватись зі зміною концентрації домішок та температури ґратки. Крім того, поляризація залежить від величини гріючого електричного поля і його напрямку відносно кристалографічних осей, а також від ступеня міждолинного перезаселення. Виясненню причин поведінки поляризації цього випромінювання було присвячено низку робіт [3–5]. Відомо, що основними механізмами розсіювання носіїв у n-Ge, які визначають його електричні характеристики, є домішкове розсіювання за низьких температур і розсіювання на акустичних коливаннях ґратки при високих.

У роботі [3] відзначалось, що для перевірки припущення про те, що різна поляризація терагерцового випромінювання гарячими носіями в n-Ge на чистих і легованих матеріалах зумовлена превалюючим типом розсіювання, необхідно провести температурні виміри цього явища.

Ідея методу полягала в тому, щоб отримати згадані характеристики поляризації при тих температурах, де кожний з цих механізмів є домінуючим, і прослідкувати їх зміну (цих характеристик) при переході від однієї температурної області до іншої. У випадку низьких температур (розсіювання на домішках) рухливість носіїв у n-Ge залежить від температури як $\mu \sim T^{3/2}$, а при високих температурах (розсіювання на коливаннях ґратки) – як $\mu \sim T^{-3/2}$. Точка максимуму рухливості, де відбувається перехід від розсіювання на домішках до розсіювання на акустичних фононах для чистого n-Ge, лежить в області ∼20 K. Можна було сподіватися, що десь у цій області температур характеристика поляризації змінить свій хід, пройшовши через нульове значення. Це означатиме, що хід поляризаційної залежності випромінювання зумовлено типом розсіювання гарячих носіїв. Чи відповідає це дійсності, повинні показати експерименти, запропоновані і здійснені у даній роботі.

2. Експеримент

Всі вимірювання проводилися на стандартних зразках, виготовлених за типовою технологією [3]. Імпульси гріючого електричного поля мали прямокутну форму довжиною 0,8 мксек, а їх амплітуда могла змінюватись у широких межах. Приймальна частина експериментальної установки відрізнялась від попередніх варіантів іншим розташуванням фільтра, поляризатора, приймача і випромінюючого зразка. Основна експериментальна трудність цих вимірів полягала у тому, що поряд із напівпровідниковим приймачем Ge(Ga), який потребує гелієвої температури, розташовано випромінюючий зразок n-Ge, температуру якого піднімали додатковим розігрівом до 50–70 K. Такий градієнт температури на відстані 8–12 мм викликає дуже великі температурні нестійкості і шумові сигнали у приймальній частині, що робить виміри практично незадовільними [3]. Проблему було вирішено у такий спосіб: приймач Ge(Ga), що знаходиться у гелії, і випромінюючий зразок, температуру якого потрібно змінювати від гелієвої до 70–80 K,

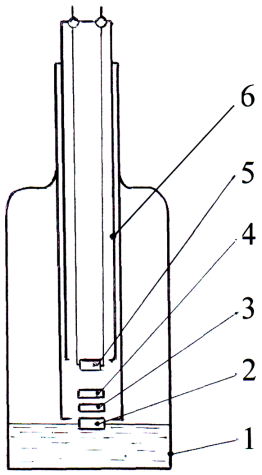

Рис. 1. Схематичне розташування деталей установки у кріостаті для проведення температурних вимірів поляризації терагерцового випромінювання з n-Ge: *1* – гелійовий кріостат ; *2* – приймач Ge(Ga); *3* – фільтр; *4* – поляризатор, що обертається в горизонтальній площині; *5* – випромінюючий зразок; *6* – рухомий світлопровід

розміщували у різних кінцях вертикального світлопроводу. Розташовуючи зразок на різній відстані від приймача (і поверхні рідкого гелію), можна було змінювати температуру випромінюючого зразка у потрібних межах. Необхідність у додатковому підігріві зразка відпадала, і температурні градієнти зводилися до мінімуму. Схематичне зображення розташування деталей експериментальної установки представлено на рис. 1.

3. Результати експерименту та їх обговорення

На рис. 2 наведено результати вимірювання температурної залежності терагерцового випромінювання гарячих носіїв германію для типового зразка ГЄС-2,5 з кристалографічною орієнтацією вздовж великого розміру зразка $\langle 111 \rangle$. Як видно, при найнижчих температурах 6,6–6,9 K хід поляризаційної залежності має типовий для легованих зразків характер. Далі з підвищенням температури зразка цей хід спрямляється, проходить через нульове значення при 7,7 K і далі під час наростання температури набуває типового для чистого матеріалу ходу. Цей хід не змінюється за подальшого підвищення температури до 77 K. Так було зафіксовано точку перегину поляризаційної характеристики в області 8 K. Якщо пов'язати цю точку з переходом від домішкового до акустичного розсіювання (де маємо максимум рухливості носіїв), то вона відрізняється від літературних даних на ∼10

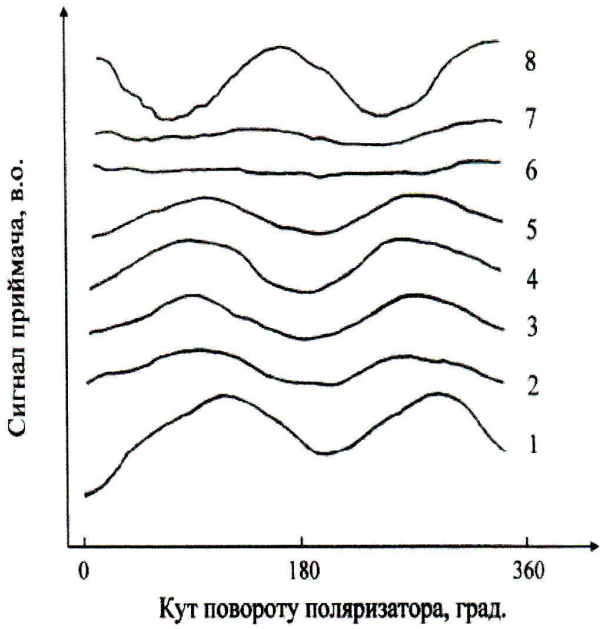

Рис. 2. Поляризаційна залежність терагерцового випромінювання з n-Ge (ГЄС – 2,5, $\langle 111 \rangle$ для різних температур (криві зміщено по шкалі амплітуд): *1* – 76 K; *2* – 57 K; *3* – 26 K; *4* – 14 K ; *5* – 8,8 K; *6* – 7,7 K ; *7* – 7,2 K; *8* – 6,6 K

K [6]. Додаткові експерименти на цілій низці зразків із відмінною концентрацією давали подібні результати (рис. 3). Різниця у вимірюванні температури, як потім виявилося, полягала у тому, що напівпровідниковий термометр вимірював температуру довкілля, що оточувало випромінюючий зразок, а сам зразок підігрівався імпульсами сильного електричного поля ($\tau_i = 0,8$ мксек, $U = 140$ В, $I = 2,6$ А, $F_{\text{повт}} = 6$ Гц). Розрахунки показала, що за тих температур (враховуючи стрімке падіння теплоємності) кількість тепла, що виділяється у зразку (рис. 2), підвищує його температуру на 10–15 K, тобто справжня температура зразка буде вищою за зафіксовану термометром на ∼10–15 K, що повністю узгоджується з літературними даними.

Отже, з уточненого положення точки температурної зміни домінуючого механізму розсіяння і вигляду кривих на рис. 2 і рис. 3 можна зробити однозначний висновок про зв'язок поляризаційної кутової залежності з механізмом розсіяння. Відбулося зміщення максимумів (мінімумів). Там, де максимуми поляризаційної залежності знаходились у випадку домішкового розсіяння, з'являються мінімуми при акустичному розсіянні.

Таким чином, наведені експериментальні результати (рис. 2 і 3) підтверджують запропоноване поясне-

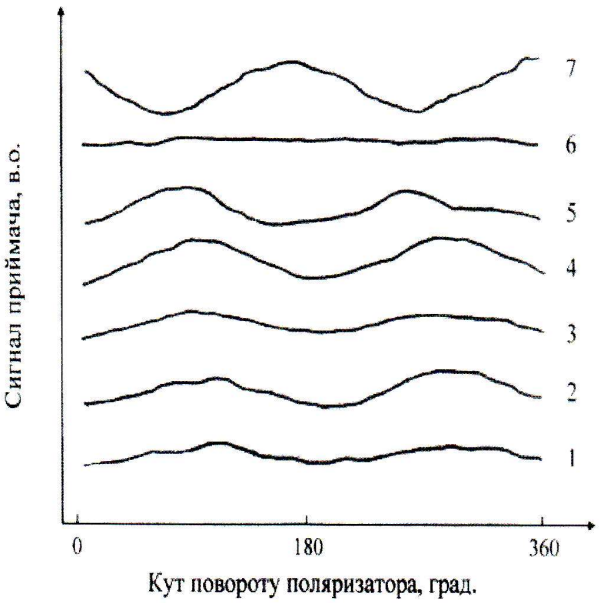

Рис. 3. Поляризаційна залежність терагерцевого випромінювання з n-Ge (ГЄС – 0,3, ⟨111⟩ для різних температур (криві зміщені по шкалі амплітуд): *1* –70 K; *2* – 57 K; *3* – 26 K; *4* - 14 K; *5* – 7,2 K ; *6* - 6,4 K; *7* - 5,7 K

ння залежності ходу поляризаційної характеристики терагерцового випромінювання гарячими електронами з n-Ge від типу розсіювання носіїв.

Висловлюємо подяку О.Г. Сарбею за детальне обговорення результатів цієї роботи та О.К. Флоровій за надання поляризаторів.

1. В.М. Бондар, О.Г. Сарбей, П.М. Томчук, ФТТ **69**, 1540 (2002).
2. П.М. Томчук, УФЖ **7**, 681 (2004).
3. В.М. Бондар, Н.Ф. Чорноморець, УФЖ **48**, 51 (2003).
4. П.М. Томчук, В. М. Бондар, УФЖ **53**, 668 (2008).
5. В.М. Бондар, Б.О. Данильченко, А.М. Крайчинський, УФЖ **54**, 491 (2009).
6. Л.П. Павлов, *Методы определения основных параметров полупроводниковых материалов* (Высшая школа, Москва, 1975).

Одержано 16.12.09

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГЕРМАНИЯ n-ТИПА В ГРЕЮЩИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ В ОБЛАСТИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

В.М. Бондар, П.М. Томчук

Р е з ю м е

Как было отмечено в работе [3], для правомерности предположения о том, что ход поляризационных зависимостей терагерцового излучения горячими электронами с n-Ge определяется типом рассеяния носителей, необходимо провести температурные измерения этой зависимости от температур, где превалирует рассеяние на примесях, до температур, где преобладает рассеяние на акустических колебаниях решетки. В данной работе приведены результаты таких исследований.

LOW-TEMPERATURE DEPENDENCES OF THE POLARIZATION OF TERAHERTZ EMISSION FROM n-GERMANIUM IN HEATING ELECTRIC FIELDS

V.M. Bondar, P.M. Tomchuk

Institute of Physics, Nat. Acad. of Sci. of Ukraine
(*46, Nauky Ave., Kyiv 03680, Ukraine;
e-mail: ptomchuk@iop.kiev.ua*)

S u m m a r y

As was noted in [3], in order to verify the assumption that the behavior of the polarization dependences of the terahertz emission by hot electrons from n-Ge is determined by the type of carrier scattering, it is necessary to perform temperature measurements of this dependence in the range between the temperatures, where the scattering is determined by impurities and by acoustic lattice vibrations, respectively. The given work presents the results of such investigations.