

УДК 537.311.322
PACS number(s): 25.70.Ef; 71.18.+y

ВИЗНАЧЕННЯ МАКРОСКОПІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ЗРАЗКІВ ЗА ДОПОМОГОЮ РЕЗОНАНСНИХ ВИМІРЮВАНЬ

О. Дьомін, О. Прокоф'єва, О. Коваленко, І. Штамбур

*Дніпропетровський національний університет,
пр. Науковий, 13, 490050 Дніпропетровськ, Україна
e-mail: proelen@ua.fm*

Останніми роками науковий інтерес становлять безконтактні методи визначення макроскопічних параметрів напівпровідників, зокрема метод магніто-розмірного резонансу, який з'являється завдяки проходженню крізь зразок геліконових хвиль.

Автори вимірювали значення магнітного поля першого та другого розмірних резонансів при фіксованій частоті. За отриманими даними були розраховані концентрації вільних носіїв заряду для деяких зразків InSb. Також в роботі були визначені значення ефективної маси носіїв заряду для зразків InSb з *p*-типом провідності.

Ключові слова: магніто-розмірний резонанс (МРР), геліконові хвилі, ефективна маса носіїв заряду, концентрація носіїв заряду, ефект Холла.

Під час дослідження напівпровідників щораз більший науковий інтерес становлять безконтактні методи визначення макроскопічних параметрів напівпровідників, зокрема метод магніто-розмірного резонансу (МРР), який з'являється завдяки проходженню скрізь зразок геліконових хвиль [1].

Якщо напівпровідниковий зразок помістити у систему схрещених полів, одне з яких H – постійне магнітне поле, а інше H_1 – перпендикулярне йому надвисокочастотне електромагнітне поле, у пучність магнітної складової НВЧ-поля ($H_1 \perp H$), то у зразку можуть виникнути слабозагасаючі низькочастотні хвилі, в яких електричний та магнітний вектори обертаються по спіралях вздовж напрямку НВЧ-поля. Це так звані геліконові (або альфенівські) хвилі [2,3].

Під час розповсюдження геліконових хвиль можлива така ситуація, коли довжина НВЧ-хвилі ззовні зразка – велика, а всередині зразка – мала порівняно з товщиною зразка. За таких умов у зразку, як у резонаторі, виникають стоячі хвилі, що й проявляється у вигляді резонансних за частотою (або за величиною магнітного поля) залежностей втрат потужності у разі взаємодії електромагнітної хвилі зі зразком. Резонанси виникають кожного разу, коли ціле число довжин напівхвиль дорівнює товщині зразка [4].

Вираз для резонансного значення напруженості магнітного поля МРР визначають концентрацією носіїв заряду та квадратом радіуса зразка:

$$H_p = \frac{2\omega m^* c}{e} + \frac{16}{21} \frac{\pi n \omega e a^2}{c}, \quad (1)$$

де m^* – ефективна маса носіїв заряду; e – заряд електрона; c – швидкість світла; ω – циклічна частота НВЧ-поля; n – концентрація носіїв заряду; a – товщина зразка.

Метою статті було визначення макроскопічних параметрів напівпровідникового зразка за спектрами магніто-розмірного резонансу. Для досліджень було вибрано напівпровідниковий матеріал InSb – вузькозонний, майже вироджений напівпровідник ($\Delta E_g = 0,18$ еВ при $T=300$ К) з рекордним значенням величини рухливості $\mu \sim 30 \div 50$ м²/В*с.

Спостереження і реєстрацію спектрів вели з допомогою радіоспектрометра ЕПР “Radiopan” трисантиметрового діапазону ($\nu = 9300$ МГц) в інтервалі магнітних полів $H = 0 \div 9000$ Е. Застосовано метод дослідження поглинання НВЧ-потужності зразком, який міститься в об'ємному резонаторі TE₁₀₂ у пучність магнітної складової НВЧ – поля [3].

Зразки для дослідження зколывалися з моноблоків InSb, вирощених із розплаву з різними типами провідності та концентраціями $n = 10^{14} - 10^{17}$ см⁻³. Після цього отриманий зразок шляхом механічної обробки доводили до пластинки необхідних розмірів: 2,5 x 5 x 5 мм³. Для одержання зразків меншої товщини пластинки зішліфовували. У такий спосіб підготовлені зразки з товщинами 2,0–0,2 мм розміщували в резонаторі радіоспектрометра так, щоб площина [110] була зорієнтована перпендикулярно до зовнішнього магнітного поля.

Під час експериментів усі досліджувані зразки виявляли резонансне поглинання НВЧ-потужності, при цьому резонансні значення напруженості магнітного поля залежали від товщини зразка та концентрації носіїв заряду.

Ми проводили експерименти по дослідженню залежності резонансного поглинання від товщини зразка. На рис. 1 показано МРР для зразка InSb з n -типом провідності при послідовному зменшенні товщини зразка.

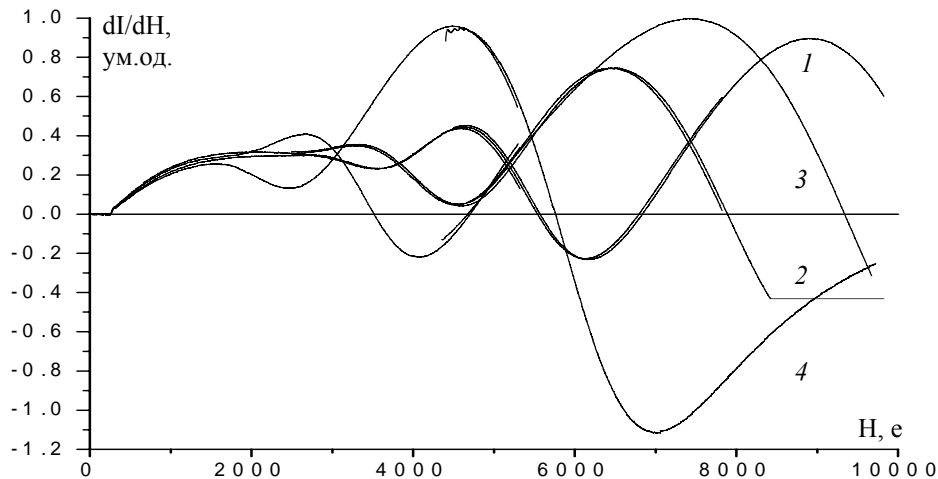


Рис. 1. Залежність спектрів МРР від товщини зразка: 1 – $a = 1,5$ мм; 2 – $a = 1$ мм; 3 – $a = 0,7$ мм; 4 – $a = 0,5$ мм

Аналізуючи рис. 1, можна визначити, що при зменшенні товщини пластинок InSb, максимуми поглинання також зміщуються у бік менших полів, що співвідноситься з формулою (1). При товщині зразка менше 1 мм спостерігається поширення резонансних ліній, можливо через перекриття резонансів.

Ми вимірювали такі показники спектрів, як значення магнітного поля першого та другого розмірних резонансів при фіксованій частоті. За отриманими даними по формулі (1) були розраховані концентрації вільних носіїв заряду для деяких зразків. Отримані значення порівнювали з незалежними від цих вимірювань значеннями, здобутими на підставі дослідження ефекту Холла у відповідних зразках. Результати розрахунків наведені у табл. 1.

Таблиця 1
Визначення концентрації носіїв заряду за спектрами магніторозмірного резонансу

Матеріал	Тип провідності	Товщина, мм	Концентрація носіїв, см ⁻³	
			Розрахунок	Ефект Холла
InSb	<i>n</i>	0,5	$2,28 \cdot 10^{14}$	$1 - 5 \cdot 10^{14}$
InSb	<i>p</i>	0,5	$3,12 \cdot 10^{15}$	$1,4 - 4,6 \cdot 10^{15}$
InSb-Fe	<i>n</i>	0,5	$9,8 \cdot 10^{14}$	$1,7 \cdot 10^{15}$

Також ми визначили значення ефективної маси носіїв заряду для зразків InSb з *p*-типом провідності. Для цього ми зняли спектри MPP для зразків InSb з *n*- та *p*-типом провідності, завтовшки 0,5 мм (рис. 2).

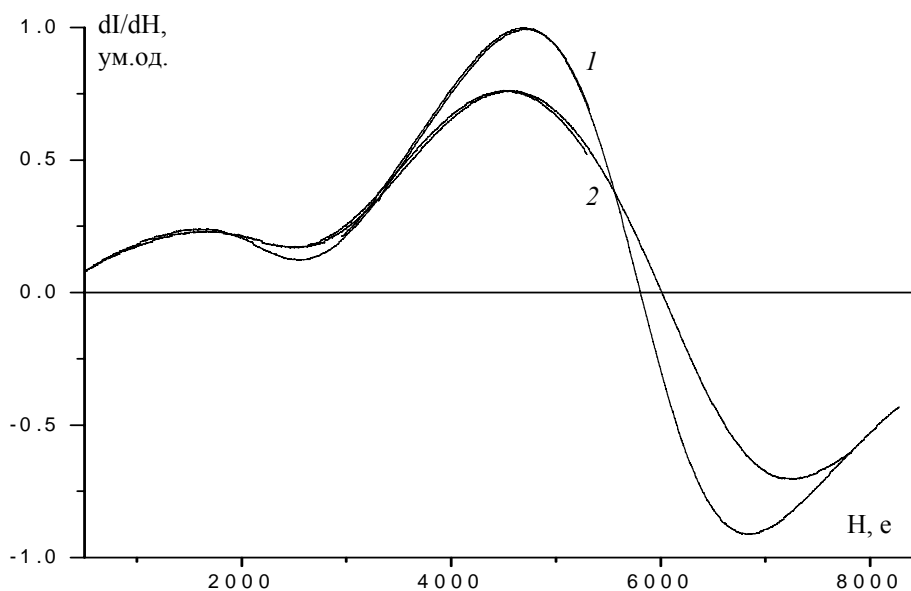


Рис. 2. Спектри MPP для зразків InSb з різними типами провідності: 1 – *n*-тип провідності; 2 – *p*-тип провідності

Підставляючи до формули (1) значення частоти НВЧ-поля ($f = 9\,000$ МГц) та відоме співвідношення для ефективної маси електрона

$$m^* = 0,013m_0, \quad (2)$$

отримаємо розрахункове значення магнітного поля при фіксованій частоті для зразка з n -типом провідності. Порівнюючи отримане розрахункове значення із значенням магнітного поля, що було визначено зі спектра МРР для зразка InSb з n -типом провідності, знайдемо чинник деполяризації кристалічної ґратки:

$$g^* = \frac{H_{роз}}{H_{експ}}, \quad (3)$$

де $H_{роз}$ – розрахункове значення магнітного поля, отримане за допомогою формули (1), $H_{експ}$ – значення магнітного поля, що було визначено зі спектра МРР для зразка InSb.

Якщо у формулу (4) підставити значення магнітного поля, що було визначено зі спектра МРР для зразка InSb з p -типом провідності, то можливо знайти розрахункове значення магнітного поля при фіксованій частоті для зразка з p -типом провідності.

З формули (1) видно, що

$$m^* = \frac{e}{2\omega c} \left(H_p - \frac{16}{21} \frac{n\pi\omega e a^2}{c} \right). \quad (4)$$

Підставляючи до (4) розрахункове значення магнітного поля для зразка з p -типом провідності, знайдемо вираз для визначення ефективної маси дірок:

$$m^* = 0,4826m_0. \quad (5)$$

Результати вимірювань та розрахунків приведені у табл. 2.

Таблиця 2

Визначення ефективної маси носіїв заряду у напівпровідниках з p -типом провідності за допомогою методу МРР

n -тип провідності			g^*	p -тип провідності		
$H_{роз}$	$H_{експ}$	m_n^*		$H_{роз}$	$H_{експ}$	m_p^*
98,6	3 103	0,013 m_0	31,5	134,6	4 241	0,4826 m_0

Отже, аналіз експериментальних даних, отриманих при дослідженні магніторозмірного резонансу, свідчить, що надвисокочастотна методика дає змогу безконтактним способом визначати головні макроскопічні параметри напівпровідників, розширюючи можливості радіоспектроскопії як методу дослідження властивостей напівпровідників.

1. Бородавский П.А., Булдыгин А.Ф. Определение подвижности и концентрации электронов в тонких полупроводниковых пленках на сверхвысоких частотах методом магнитоплазменного резонанса. ФТП. 1999. Т. 33. № 10. С. 1224–1228.
2. Кингсет А.С. Плазма как объект физических исследований // Соросовский образовательный журнал. 1996. № 2. С. 98–104.

3. Прокоф'єва О.О., Штамбур І.В., Коваленко О.В. Дослідження магніто-розмірного резонанса у зразках антимоніда індію // Фотоелектроніка, Одесса: Изд-во ОГУ-Астропринт, 2002. Вып. 11. С. 6–8.
4. Dresselshous G., Kip A.F., Kittel C. Plasma Resonance in Crystals // Phys.Rev., 1995. Vol. 100. № 12. P. 618–629.

**DEFINITION OF MACROSCOPICAL PARAMETERS
OF SEMICONDUCTORS BY MEANS
OF RESONANT MEASUREMENTS**

A. Demin, E. Prokofeva, A. Kovalenko, I. Stambur

*Dnepropetrovsk National University,
Naurova Str., 13, UA-49050 Dnepropetrovsk, Ukraine
e-mail: proelen@ua.fm*

Last years scientific interest contactless methods of definition of macroscopical parameters of semiconductors, in particular, cause a method of a magnito-dimensional resonance which results from passage gelikonovyh waves through a sample. Authors carried out measurements of values of a magnetic field dimensional resonances at the fixed frequency. By the received results concentration of free carriers of a charge for some samples InSb have been designed. Also in work values of effective weight of carriers of a charge for samples InSb with *p*-type of conductivity have been determined.

Key words: magnito-dimensional resonance, gelikon waves, effective weight of carriers of a charge, concentration of carriers of a charge, effect of the Hall.

Стаття надійшла до редколегії 19.05.2004
Прийнята до друку 21.11.2005