

О. М. Рачковський¹, С. В. Оптасюк², Р. А. Поведа³

Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка

e-mail: ¹rachkovskyy@kpnu.edu.ua, ²optasyuk.s@kpnu.edu.ua, ³povedar@kpnu.edu.ua;ORCID: ¹0000-0002-5493-9238, ²0000-0003-1784-7155, ³0000-0002-0067-6153

ОСОБЛИВОСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГАЛЬВАНОМАГНІТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ТОНКИХ ПЛІВОК

У статті розглянуто один із методів дослідження гальваномагнітних явищ тонкоплівкових напівпровідникових сполук системи A^IVB^VI . Отримані вольт-амперні характеристики тонких плівок $PbTe:Sb$ та проаналізовані основні параметри тонких плівок для різної товщини за допомогою методу Холла. Встановлена залежність рухливості та концентрації основних носіїв заряду плівки $PbTe:Sb$ від товщини. Показано, що зі зменшенням товщини плівки збільшується концентрація носіїв заряду.

Ключові слова: ефект Холла, методи вимірювань, носії заряду, тонкі плівки, тип провідності.

Тонкоплівкові сполуки системи добре зарекомендували себе в таких галузях електроніки, як сонячні батареї, в якості джерел і детекторів середнього і далекого інфрачервоного діапазону оптичного спектру, для елементів пам'яті і вони є базовим матеріалом для створення тонкоплівкових термоелектричних перетворювачів енергії [1]. Матеріали такого типу серед усіх напівпровідникових сполук являються унікальними через ряд певних фундаментальних характеристик: ширина забороненої зони, висока концентрація іонів, радіаційна стійкість, високі значення рухливості носіїв заряду, а вивчення гальваномагнітних явищ є досить потужним методом для дослідження електрофізичних параметрів сполук такого типу.

Дослідження ефекту Холла в тонких плівках може використовуватися при створенні макросенсорних електронних пристроїв, а також як метод контролю технологічних процесів мікро і нанoeлектронних приладів. З причини малої товщини плівкового зразка, величина ЕРС Холла може досягати досить великих величин, а виготовлення таких зразків може бути технологічно простіше. В даній роботі представлені результати дослідження впливу магнітного поля на електрофізичні параметри тонкоплівкових напівпровідникових структур. Зокрема показано, як використовуючи ефект Холла, можна отримати основні електрофізичні параметри напівпровідників.

Об'єктом дослідження були тонкоплівкові напівпровідникові сполуки $PbTe:Sb$ різної товщини. Плівки були отримані методом вакуумного термічного розпилення. Товщина плівок визначалась за допомогою інтерферційного мікроскопа МІІ-4. Електрофізичні параметри визначали за допомогою ефекту Холла методом поперечної різниці потенціалів при постійних електричних і магнітних полях у різних напрямках. Величина постійного магнітного поля становила 0.91 Тл, температура 300 К.

Розглянемо якісно дію магнітного поля на напівпровідник, яким протікає електричний струм, а магнітне поле перпендикулярне напрямку руху зарядів. Нехай напівпровідник являє собою паралелепіпед з перерізом $dx \cdot b$. Електричне поле направлене уздовж осі y (E_y), а магнітне поле – уздовж осі z (B_z). Під дією електричного поля носії заряду набувають швидкості направленої руху v_d – дрейфової швидкості – вздовж поля для дірок і проти поля для електронів. Якщо носії заряду – дірки, то під дією магнітного поля вони від-

хилитимуться до лівої грані зразка і на цій грані накопичиться позитивний електричний заряд, а на протилежній грані залишиться некомпенсований негативний заряд. Якщо носії заряду електрони, то під дією магнітного поля вони також відхилитимуться на ліву грань і накопичуватимуться там, створюючи негативний заряд, а на протилежній грані залишатиметься некомпенсований позитивний заряд [1-4].

Врахуємо, що сила Лоренца, яка діє на рухомий електрон або дірку, перпендикулярна швидкості руху електрона або дірки й індукції магнітного поля (1), де e – заряд носія струму, v_d – дрейфова швидкість руху, B – індукція магнітного поля. Оскільки $v_d = uE = \frac{e\lambda}{m^*v} [E, B]$, то останнє рівняння набуває вигляду:

$$F_{\text{Лор}} = \frac{e^2\lambda}{m^*v} [E, B], \quad (1)$$

тобто сила Лоренца не залежить від знаку носіїв заряду, а визначається лише напрямком полів E і B або густиною струму j і B .

Якщо у створенні електричного струму беруть участь і дірки, і електрони, то картина значно ускладнюється. У випадку, коли рухливості та концентрації електронів і дірок однакові, то за рахунок взаємної компенсації електронів і дірок біля бічних граней пластинки сумарний заряд буде рівний нулеві. Оскільки ж ця рівність не має місця, тобто концентрація або рухливості носіїв одного знаку більші, ніж іншого, то біля бічних граней пластинки відбувається часткова взаємна компенсація зарядів електронів і дірок, а на гранях накопичуються заряди протилежних знаків, відмінні від нуля. Раз протилежні грані напівпровідникового зразка заряджаються, то виникає поперечне відносно до E_y і B_z , електричне поле E_x і відповідна різниця потенціалів, тобто електрорушійна сила (ЕРС). Явище виникнення поперечної напруженості електричного поля E_x в напівпровіднику унаслідок відхилення електронів або дірок провідності, що створюють електричний струм густиною j у поперечному магнітному полі з індукцією B називається ефектом Холла, а відповідна ЕРС – ЕРС Холла (ϵ). На рис. 1 можна розглянути різні типи виникнення ЕРС Холла в напівпровідниках [4].

Розглянемо рівняння руху електрона за наявності електричного і магнітного полів з урахуванням

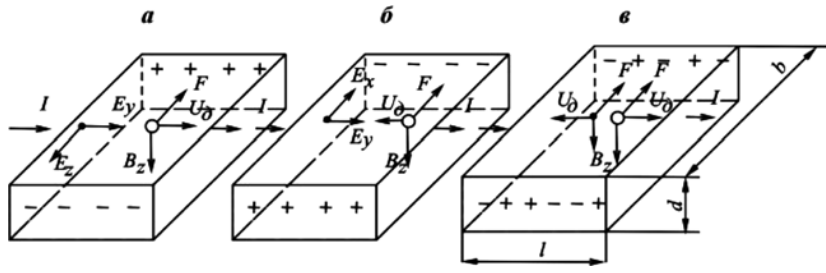


Рис. 1. Виникнення ЕРС Холла у напівпровідниках з дірковою (а), електронною (б) та змішаною (в) провідністю

затухання внаслідок зіткнень за теорією Друде має вигляд:

$$\frac{dp}{d\tau} = e \left(E + \left[\frac{p}{m} \times B \right] \right) - \frac{p}{\tau}, \quad (2)$$

де $p = mv$ – імпульс електрону; p/τ – аналог сили тертя, пропорційної швидкості руху електрону і напрямленої проти неї, τ – час релаксації, або час вільного пробігу носіїв заряду, і являє собою середній час між двома послідовними зіткненнями. Варто мати на увазі, що сила Лоренца не є однаковою для всіх електронів, оскільки вона залежить від швидкості електрона v . Тому силу Лоренца у рівнянні (2) потрібно вважати середньою силою у розрахунку на один електрон [4, 5].

У стаціонарному стані сила струму не залежить від часу, тому проекції рівняння (3) на координатні осі мають вигляд

$$0 = eE_x + \omega_0 p_y - \frac{p_x}{\tau}; \quad 0 = eE_x - \omega_0 p_x - \frac{p_y}{\tau}, \quad (3)$$

де $\omega_0 = \frac{e}{m}B$ – циклотронна частота, а компонента струму вздовж осі z дорівнює нулю.

Помноживши рівняння (3) на $\frac{e}{m}B\tau$ і ввівши компоненти густини струму, знаходимо:

$$\sigma E_x = -\omega_0 \tau j_y + j_x; \quad \sigma E_x = -\omega_0 \tau j_x + j_y. \quad (4)$$

Напруженість поля Холла E_x визначається з вимоги рівності нулю густини поперечного струму j_y , пов'язаного із дрейфом носіїв заряду. Якщо у другому рівнянні системи (4) j_y прийняти рівним нулю, отримуємо

$$E_x = \frac{\omega_0 \tau j_x}{\sigma} = \frac{1}{ne} j_x B. \quad (5)$$

Оскільки поперечне поле E_y врівноважує силу Лоренца, воно повинно бути пропорційним як індукції магнітного поля B , так і густині струму j_x у провіднику. Коефіцієнт пропорційності в співвідношенні (5) являє собою постійну Холла для даного матеріалу

$$R_H = \frac{1}{ne}. \quad (6)$$

Більш точні обчислення, що враховують відмінність швидкостей окремих електронів від їх середнього значення, призводять лише до незначної зміни числового множника у формулі (6)

$$R_H = \frac{3\pi}{8} \frac{1}{ne}. \quad (7)$$

Якщо вважати товщу зразка за d , а ширину за b , то різниця холлівських потенціалів на контактах буде мати вигляд:

$$U_y = E_y b = \frac{bB}{ne} j_x = R_H j_x b B = \frac{R_H B I}{d}, \quad (8)$$

де $I = j_x b d$ – сила струму, який протікає у зразку. Величини I , B та U_y можуть бути отримані експериментально, отже за формулою (8) можна визначити значення постійної Холла, а отже, і концентрацію носіїв заряду (7) у речовині.

Оскільки в магнітному полі поряд з холлівськими контактами присутня деяка додаткова напруга, обумовлена гальваномагнітними явищами, необхідно напругу між холлівськими контактами вимірювати при двох протилежних напрямках магнітного поля і, відповідно, обраховувати середнє значення [4]

$$U_H = \frac{U_1 - U_2}{2}. \quad (9)$$

Вимірювання зазвичай проводять на зразку у формі паралелепіпеда (рис. 2), що має два торцеві контакти і три бічні. Контакти 1 і 5 служать створення струму через зразок. Постійне магнітне поле B прикладається перпендикулярно до великої грані зразка. Відповідно до ефекту Холла між контактами 2 і 3 виникає холлівська різниця потенціалів U_{23} . На бічній поверхні зразка є додатковий контакт 4, який разом з контактом 3 служить для вимірювання поздовжнього падіння напруги U_{23} на відстані між L контактами.



Рис. 2. Вид зразка для Холлівських вимірів

Знаючи напругу U_{23} відстань між контактами 3 і 4 (L), ширину b і товщину h зразка можна розрахувати величину питомої електропровідності σ

$$\sigma = (I \cdot L) / (b \cdot h \cdot U_{34}). \quad (10)$$

Для розрахунку рухливості носіїв заряду у досліджуваному зразку необхідно скористатися формулою:

$$\mu = \sigma R_H. \quad (11)$$

В дійсності визначений таким чином коефіцієнт Холла неточний, у ньому не врахована різниця між повною швидкістю електронів, що входить у вираз магнітної сили, і дрейфової швидкістю, яку електрон набуває під дією електричного поля. Крім того, не враховується розподіл електронів за швидкостями та механізм розсіювання носіїв. Врахування цих явищ може призводити до поправок [5].

На рис. 3 представлені вольт-амперні характеристики (ВАХ) плівок різної товщини. Як видно з рис. 3 ВАХ для всіх плівок мають лінійний характер, що свідчить про омичність контактів у зразках.

Використавши закон Ома та вираз для обчислення опору провідника правильної форми

$$R = \frac{U_x}{I}, \quad (12)$$

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (13)$$

Таблиця 1.

Основні електрофізичні параметри зразків

Параметр	PbTe:Sb ($d = 0.54$)	PbTe:Sb ($d = 0.351$)	PbTe:Sb ($d = 0.09$)
σ , [Ом ⁻¹ см ⁻¹]	$9,175 \cdot 10^{-2}$	$2,36 \cdot 10^{-2}$	$3,61 \cdot 10^{-2}$
R_H , см ³ /кл	16,6	11,7	4,9
n , см ³	$3,8 \cdot 10^{17}$	$5,34 \cdot 10^{17}$	$1,2 \cdot 10^{18}$
μ , см ² /Вс	1,52	27,6	$17,6 \cdot 10^{-2}$
U_{HP} , В	129,92	24,6	30,1
Тип провідності	n	n	p

З аналізу отриманих залежностей слід виділити дві особливості: перша – із зменшенням товщини плівки збільшується концентрація вільних носіїв заряду; друга – між товщиною плівки і рухливістю носіїв заряду не спостерігається залежність (рис. 4, а). Ймовірно рухливість носіїв в області малих товщин ($d = 0,5$ мкм) різко зменшується [2].

На збільшення концентрації (рис. 4, б) може впливати ряд деяких факторів: чим тонша плівка тим суттєвішим є вплив підкладки на концентрацію і рухливість носіїв струму у плівці [1] та певні технологічні умови вирощування плівок (температура і тип підкладки, швидкість осадження тощо), завдяки яким товщина плівки може змінити механізм переносу заряду [3]. Також слід зазначити, що зміна концентрації носіїв заряду може буди пов'язана із акцепторною дією кисню, оскільки вклад поверхневого окисленого шару залежить від товщини плівки: чим більша товщина плівки, тим він менший [4].

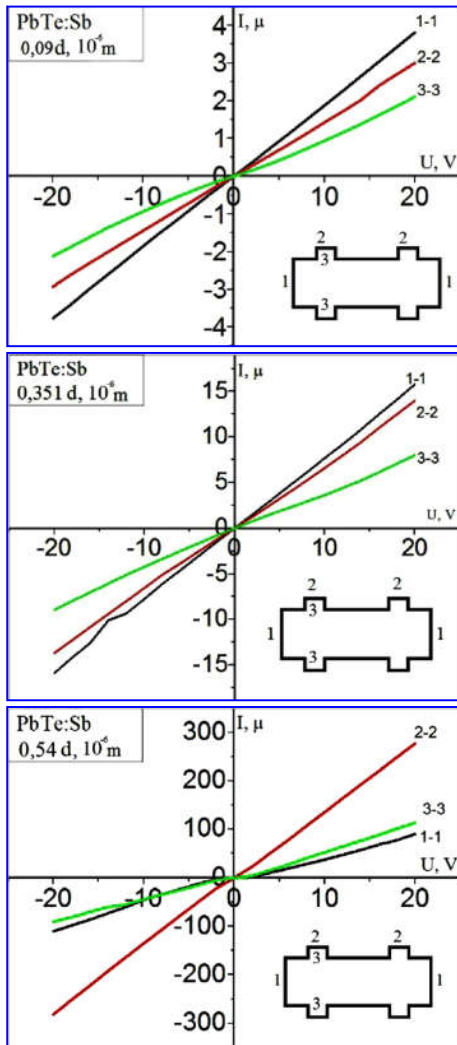


Рис. 3. Вольт-амперні характеристики зразків плівок PbTe:Sb.

Можна розрахувати питомий опір ρ , відповідно, питому електропровідність (12, 13) зрізків при кожному значенні електричного поля в постійному магнітному полі в обох напрямках струму і магнітного поля.

$$\rho = \frac{U_x S}{I l}, \quad (14)$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho}. \quad (15)$$

По отриманих в роботі експериментальних даних обчислено рухливість носіїв струму. У випадку носіїв заряду одного знаку рухливість визначається рівнянням

$$\mu_{n,p} = |R_H| \sigma = \frac{|R_H|}{\rho}. \quad (16)$$

За рівняннями 9-10 та 15-16, враховуючи середні значення холівської напруги та виміри у двох різних напрямках струму і магнітного поля, розраховано основні електрофізичні параметри зразків, які були представлені у таблиці 1.

За отриманими розрахунками, згідно таблиці 1, побудовано залежності рухливості та концентрації носіїв заряду від товщини плівки (рис. 4).

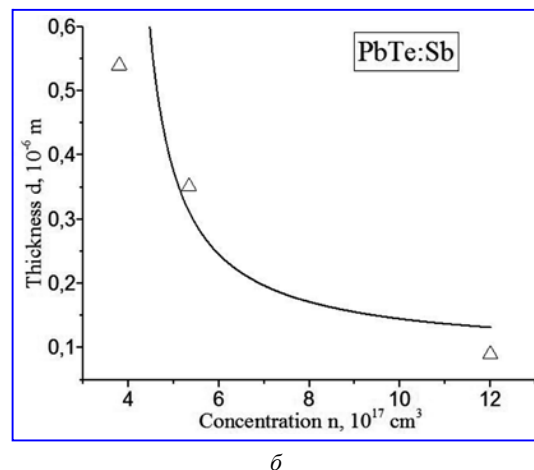
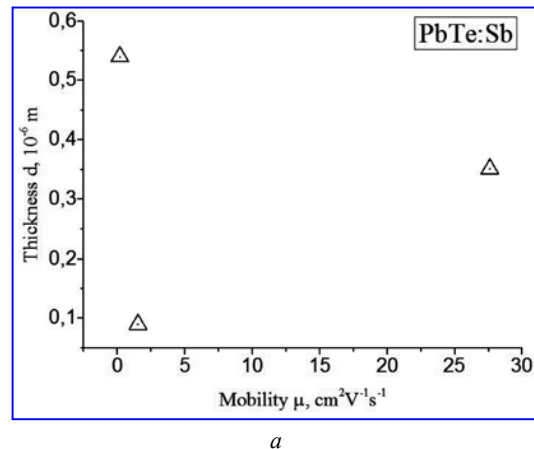


Рис. 4. Залежність рухливості носіїв заряду (а) та концентрації носіїв заряду (б) від товщини плівки

Таким чином, показано, що класичний метод є найбільш оптимальним та достовірним методом визначення е.р.с. Холла. Отримані вольт-амперні характеристики тонких плівок PbTe:Sb та їх лінійність свідчить про омичність контактів. Отримано значення постійних Холла та е.р.с. Холла для тонкоплівкових напівпровідникових структур PbTe:Sb різної товщини. Встановлена залежність концентрації та рухливості носіїв заряду від товщини плівки PbTe:Sb.

Список використаних джерел:

1. Салій Я.П., Фреїк Д.М., Юрчишин І.К., Фреїк І.М. Періодичність розподілу власних дефектів у епітаксійних плівках PbTe. *Журнал нано- та електронної фізики*. 2013. Т. 5. № 3. С. 46-53.
2. Дзундза Б.С., Костюк О.Б., Маковишин В.І. Товщинні залежності термоелектричних параметрів тонких плівок на основі сполук LAST. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2016. Т. 17, № 3. С. 368-371.
3. Остафійчук Б.К., Никируй Л.І., Кланічка В.М., Шперун В.М. Про механізми розсіювання носіїв струму в кристалах n-PbS. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2001. Т. 2, № 1. С. 121-124.

4. Makhniy V.P., German I.I., Parfenyuk O.A. Hall effect in crystals CdTe, doped with Sn. *Semiconductors*, 2014. V. 48, N. 11. P. 89-97.
5. Фреїк Д.М., Никируй Л.І., Кланічка В.М., Шперун В.М., Собкович Р.І., Довгий О.Я. Зонна структура та механізми розсіювання у кристалах n-PbSe при 77К. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2000. Т. 1, № 2. С. 245-249.
6. Rhoderick E.H. The Hall effect – an important diagnostic tool. *UMIST. Manchester UK. Ill-Vs Review*. 2000. Vol. 13, No. 3. P. 43-51.

Oleh Rachkovskiy, Serhiy Optasyuk, Ruslan Poveda
Kamianets-Podilskiy National Ivan Ohienko University

FEATURES OF THE RESEARCH OF GALVANOMAGNETIC CHARACTERISTICS OF SEMICONDUCTOR THIN FILMS

The paper describes one of the methods of investigation of galvanomagnetic phenomena compound thin film semiconductor system A^IVB^VI . The resulting current-voltage characteristics of thin films PbTe: Sb and analyzed the basic parameters for thin films of different thicknesses using the method of Hall. The dependence of the film thickness PbTe:Sb on the mobility and concentration of major carriers.

Key words: Hall effect, measurement methods, charge carriers, thin films, conductivity type.

Отримано: 19.10.2022

УДК 550.34.06

DOI: 10.32626/2307-4507.2022-28.125-129

О. Е. Смірнов¹, М. С. Мунтян², А. О. Губанова³, С. В. Оптасюк⁴

^{1,2,3}Регіональний центр спеціального контролю

⁴Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка

e-mail: ¹ollexij@ukr.net, ²montana.m.s17@gmail.com, ³agubkam@gmail.com, ⁴optasyuk.s@kpn.edu.ua;

ORCID: ⁴0000-0003-1784-7155

МЕТОДИЧНИЙ АСПЕКТ ПРОВЕДЕННЯ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ЗА ЗМІНОЮ ОБ'ЄМНОЇ КОНЦЕНТРАЦІЇ РАДОУ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ГЕОГРАФІЧНО-СЕЙСМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ У РЕГІОНІ

У статті описані та проаналізовані дані спостережень змін концентрації радону на поверхні Землі. Проілюстровано, що при відсутності інших чинників, зміни концентрації радону пов'язані зі зміною атмосферного тиску. Наведені результати спостереження зв'язку змін концентрації радону з наближенням землетрусів. Експериментальні дані можуть слугувати підтвердженням того, що у «чутливих» точках підвищення концентрації радону є передвісником землетрусів у ближній зоні. Вказані літературні джерела, які підтверджують аномальну поведінку змін концентрації радону перед землетрусами.

Ключові слова: радіаційний фон, об'ємна концентрація радону, атмосферний тиск, землетрус, геологічна будова, тектонічні розломи.

Дослідження об'ємної концентрації радону в місцях постійного проживання людей важливе для забезпечення захисту населення від надмірного радіоактивного випромінювання. За даними Міжнародної комісії з радіологічного захисту та Наукового комітету з дії атомної радіації ООН найбільша частина дози опромінення (близько 80% від загальної), що одержує населення у звичайних умовах, пов'язана саме з природними джерелами радіації (рис. 1). Більше половини цієї дози обумовлено присутністю газу радону та його дочірніх продуктів розпаду (ДПР) у повітрі будівель, в яких людина проводить більше 70 часу [1].

Ще в 1980 році було відмічено можливість використання аномальної еманції радону в якості передвісника землетрусів [2, с. 150]. Даний метод полягає у тому, що

всі породи в більшій чи меншій мірі радіоактивні. Коли відбувається розкриття тріщини, площа контактів породи з підземними водами збільшується, тому повинна також збільшуватись і концентрація розчиненого у воді радону. Ці зміни можна фіксувати, відбираючи проби води з глибоких свердловин. Вміст радону в них визначати лічильником Гейгера в лабораторії.

Крім того у ряді досліджень [3-5] був доведений зв'язок між характером зміни концентрації радону з умовами його виходу на поверхню Землі та наближенням землетрусів. Висловлена гіпотеза, що такі зміни можуть слугувати їх передвісниками.

У статті приведені дані спостережень змін концентрації атмосферного радону поблизу Оріхово-Павлоградського тектонічного розлому, розташування