

АКУСТОЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ  
—  
ACOUSTOELECTRONIC SENSORS

---

---

УДК 621.315.592.2, 534.27

**АКУСТОЧУТЛИВИЙ СЕНСОР НА ОСНОВІ  
НАПІВПРОВІДНИКОВОГО ДАТЧИКА ХОЛЛА  
(За матеріалами доповіді на конференції СЕМСТ-2)**

*М. Д. Тимочко, Я. М. Оліх*

Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України,  
пр. Науки 41, Київ, Україна, 03028, тел. (044) 525-62-56,  
e-mail: tymochko@ukr.net / jaroluk3@ukr.net

**Анотація**

**АКУСТОЧУТЛИВИЙ СЕНСОР НА ОСНОВІ НАПІВПРОВІДНИКОВОГО ДАТЧИКА ХОЛЛА**

*М. Д. Тимочко, Я. М. Оліх*

В роботі вперше запропонована можливість значного підвищення чутливості напівпровідникового давача Холла (ДХ) за допомогою ультразвукових (УЗ) хвиль; принцип динамічного керування ДХ зумовлений ефектом акустостимульованого зсуву температури інверсії, величина якого визначається інтенсивністю УЗ хвилі. Такий ДХ є сенсором акустичного поля.

**Ключові слова:** давач Холла, ультразвукові хвилі, інверсія коефіцієнта Холла.

**Abstract**

**ACOUSTOSENSITIVITY SENSOR BASED ON SEMICONDUCTOR HALL SENSOR**

*М. Д. Tymochko, Ya. M. Olikh*

In first there is offered a possibility of considerable rise of sensitivity of semiconductor Hall sensor (HS) by means of ultrasonic (US) waves; the principle of dynamic control of HS by the effect of acoustostimulated change of inversion temperature, the magnitude of the change is determined by US wave intensity. Such HS is a sensor of the acoustic field.

**Keywords:** Hall sensor, ultrasonic waves, Hall coefficient inversion

## Аннотация

## АКУСТОЧУСТВИТЕЛЬНЫЙ СЕНСОР НА БАЗЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДАТЧИКА ХОЛЛА

Н. Д. Тимочко, Я. М. Оліх

В работе впервые предложена возможность значительного увеличения чувствительности полупроводникового датчика Холла (ДХ) с помощью ультразвуковых (УЗ) волн; принцип динамического управления ДХ обусловлен эффектом акустостимулированного сдвига температуры инверсии, величина которого определяется интенсивностью УЗ волны. Такой ДХ является сенсором акустического поля.

**Ключевые слова:** датчик Холла, ультразвуковые волны, инверсия коэффициента Холла

Ефект Холла, відкритий Едвіном Холлом в 1879 році, знайшов практичне застосування у 1968 році в якості твердотільних давачів Холла (ДХ). ДХ працює на ефекті виникнення холлівської ЕРС при розміщенні напівпровідникової пластинки зі струмом у поперечному магнітному полі і використовується в дуже багатьох вимірювальних пристроях та схемах автоматики. Наприклад, в магнетометрах — для вимірювання напруженості постійних і змінних магнітних полів; струмомірах — для вимірювання величин струмів в електричних кабелях; ватметрах; перетворювачах постійного струму в змінний; генераторах електричних коливань і т.д. Перевагами даних приладів є їх безінерційність, відсутність рухомих частин і малі габарити, а також стійкість проти дії світла, димової та електромагнітної взаємодії і висока конкурентна спроможність, викликана низькою собівартістю та масовим виробництвом. До недоліків слід віднести їх чутливість до температури, тиску та хімічного складу повітря [1].

Нетрадиційне використання ДХ для діагностики акустичного поля, яке пропонується в даній роботі, може розширити їх практичне застосування в сучасній техніці. Чутливість ДХ до ультразвуку (УЗ) досягається вибором напівпровідника зі змішаним типом провідності  $\sigma_{n,p}$ , причому: а) температура інверсії  $\sigma_{n,p}$  матеріалу  $T_{in}$  повинна попадати в температурний діапазон роботи ДХ; б) при введенні в зразок УЗ хвилі змінюється  $\sigma_{n,p}$ . При наближенні робочої температури ДХ  $T_w$  до  $T_{in}$  в результаті значної крутизни залежності холлівської напруги  $U_H$  від температури  $T$  і/або магнітного поля  $B$  при  $T_{in}$  реалізується надзвичайно висока чутливість  $U_H$  до змін  $B$  і  $T$ . Оскільки  $U_H = (jB/d)R_H = c \cdot R_H$  (тут  $c = jB/d$  — конструктивний параметр,  $j$  — густина струму в колі ДХ,  $d$  — товщина пластинки напівпровідника), то чутливість ДХ до темпе-

ратури  $S_T = \partial U_H / \partial T$  визначається залежністю  $R_H(T)$ . В свою чергу,  $R_H(T)$  в області змішаної провідності визначається формулою:

$$R_H = -\frac{r_H (\mu_n^2 n - \mu_p^2 p)}{e (\mu_n n + \mu_p p)^2}, \quad (1)$$

де  $n$  і  $p$  — концентрація електронів та дірок;  $b = \mu_n / \mu_p$  — співвідношення їх рухливостей. Інверсія знаку  $U_H$  відбувається при  $R_H = 0$ , а згідно (1) це відповідає умові  $p = nb^2$ . При наближенні  $T_w$  до  $T_{in}$  для даного напівпровідникового матеріалу, як з боку високих температур, так і зі сторони низьких, зростає крутизна  $R_H(T)$ , а значить і  $S_T$ . Отже,  $U_H$  в околі  $T_{in}$  чутлива до найменших змін електрофізичних параметрів напівпровідника. При УЗ дії, коли відбувається акустостимульований (АС) зсув  $T_{in}$ , можна за допомогою УЗ керувати  $T_w$ , наближаючи її до  $T_{in}$  і досягати при цьому значного зростання ( $\partial R_H / \partial T$ ) — в десятки і в сотні разів. Величина АС зсуву  $\Delta T_{in}$  буде залежати від інтенсивності УЗ ( $W_{US}$ ) і визначатиметься співвідношенням концентрацій ( $n$  і  $p$ ) та рухливостей ( $\mu_n$  і  $\mu_p$ ) носіїв різних знаків та їх перерозподілом при УЗ дії. Тому такі прилади володіють надзвичайно високою сприйнятливістю до впливу зовнішніх факторів, зокрема до УЗ, і представляють значний науковий та практичний інтерес.

На рис. 1 приведена блок-схема установки для вимірювання характеристик модифікованого акусточутливого ДХ. Основними елементами такого ДХ є напівпровідникова пластинка, яка через акустичні зв'язки і акустичний буфер пов'язана з п'єзоперетворювачем. Акусточутливий ДХ поміщають в постійне магнітне поле (в нашому випадку  $B = 0,45$  Тл). Додатково необхідні джерело постійного струму, ВЧ-генератор і вольтметри — для контролю за температурою, струмом та  $U_H$ .

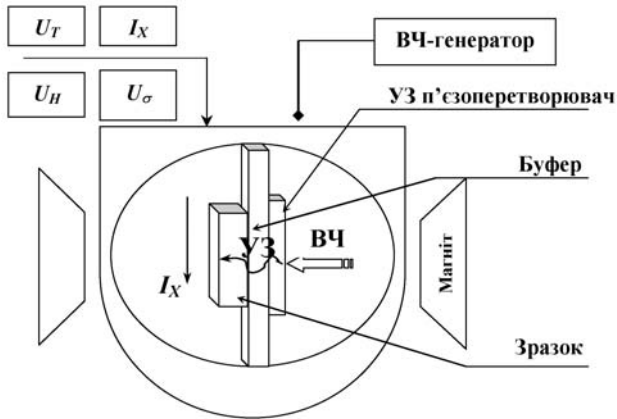


Рис. 1. Блок-схема установки для вимірювання характеристик модифікованого акусточутливого датчика Холла.

Базовими матеріалами для модифікованого акусточутливого сенсора можуть бути будь-які об'ємні чи плівкові структури, для яких характерна  $T_{in}$ . Вперше ефект УЗ зсуву  $T_{in}$  спостерігався у нейтронно-опромінених зразках бездислокаційного кристала Ge, в якому відбувалася акустостимульована інверсія провідності від домішкової р-типу до власної [2]. Було показано, що величина та знак ефекту визначаються станом системи дефектів кристала в залежності від умов вирощування, зберігання, проведених опромінь та стадій відпалу; зроблено припущення, що механізм УЗ впливу визначається зміною ефективності розсіяння носіїв струму та зміщенням рівня Фермі. На рис. 2 приведено температурні залежності  $R_H(T)$  як у відсутності УЗ (криві 1), так і при УЗ дії (криві 2). Відзначимо, що в залежності від стану дефектів в кристалі, який визначається температурою та стадією відпалу зразку  $T_{an}$ , спостерігається АС зсув  $T_{in}$  як в область низьких (а), так і в область високих температур (б), відповідно. А саме, у випадку  $T_{an}=210^\circ\text{C}$  — зсув відбувається в сторону низьких температур (а), а у випадку  $T_{an}=360^\circ\text{C}$  — у бік високих температур (б). Експериментально встановлено, що динамічний (під час УЗ дії) зсув  $T_{in}$  відбувається майже за лінійним законом,  $\Delta T_{in} = k \cdot \Delta W_{US}$ . Для Ge  $k \approx 4 \text{ (K} \cdot \text{cm}^2)/\text{Вт}$ . При  $\Delta W_{US} = 2 \text{ Вт} \cdot \text{cm}^2$  величина зсуву  $\Delta T_{in} = 8 \text{ К}$ . Пізніше подібні ефекти спостерігалися на зразках  $\text{Cd}_x\text{Mn}_y\text{Hg}_{1-x-y}\text{Te}$  [3], а також на  $\gamma$ -опромінених зразках Si [4]. У випадку монокристалічних зразків вузькощілинних твердих розчинів  $\text{CdMnHgTe}$  при УЗ дії ( $f_{US} = 5\text{--}17 \text{ МГц}$ ,  $W_{US} \leq 1 \text{ Вт} \cdot \text{cm}^2$ ) спостерігався значно більший, ніж у Ge, зсув  $\Delta T_{in}$  — на  $30\text{--}50^\circ\text{C}$

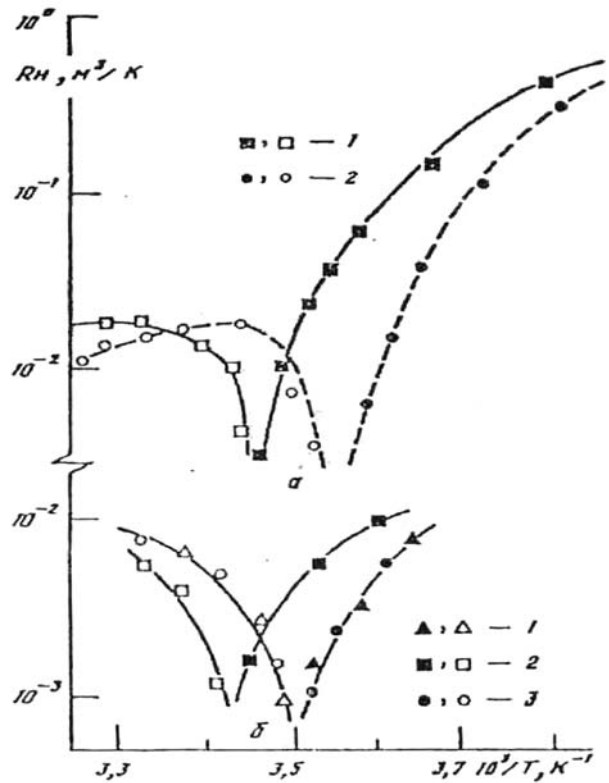


Рис. 2. Температурні залежності коефіцієнта Холла  $R_H(T)$  в нейтронно-опромінених кристалах Ge без УЗ (крива 1) та з УЗ ( $f=7 \text{ МГц}$ ,  $W_{US}=2 \text{ Вт} \cdot \text{cm}^2$ ) (2): а) зсув  $T_{in}$  в область низьких температур; б) зсув  $T_{in}$  в область високих температур. Світлі точки відповідають n-типу провідності, а темні — p-типу.

( $k \approx 25 \text{ (K} \cdot \text{cm}^2)/\text{Вт}$ ), і теж, в залежності від стану дефектної системи кристала, як в бік низьких, так і високих температур. На рис. 3 представлено АС зміни температурних залежностей  $R_H$  в зразках  $\text{CdMnHgTe}$  з різним типом дефектної структури та зсув  $T_{in}$  при УЗ дії. У випадках (а) та (б) вимірювались  $R_H(T)$  у відсутності УЗ навантаження, але вже на зразках які спеціально оброблялися в УЗ полі (криві 1 — до, а криві 2-4 — після УЗ обробки). Вплив УЗ призвів до зсуву  $T_{in}$  у сторону високих температур і такі зміни були незворотними. З рис 3а видно, що при підвищенні інтенсивності  $W_{US}$  після подальших етапів УЗ обробки зсувається максимум залежності  $R_H(T)$  і збільшується її крутизна та спостерігається поступове наближення до інверсії; для іншого зразка безпосередньо спостерігається зсув  $T_{in}$  (рис.3б). У випадку рис.3в вимірювались  $R_H(T)$  при УЗ навантаженні (тобто в процесі дії УЗ — *in-situ*); АС зміни є зворотними і при виключенні УЗ швидко релаксують до вихідних значень, але зсув  $T_{in}$  відбувається вже в сторону низьких температур. Тип провіднос-

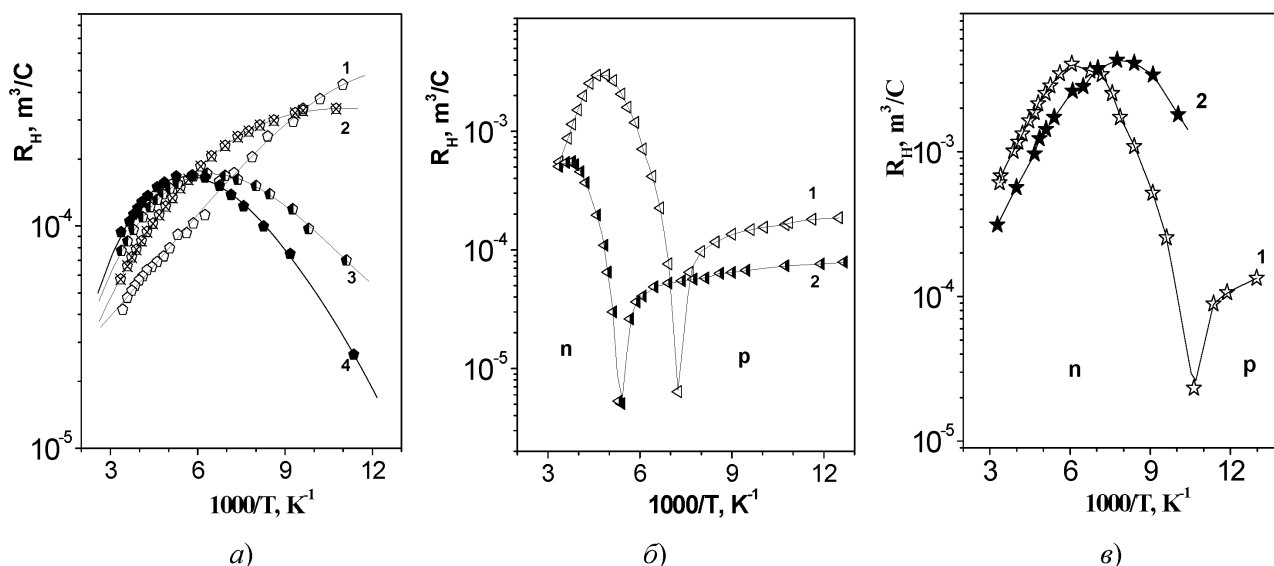


Рис. 3.  $R_H(T)$  в кристалах твердих розчинів  $Cd_{0,12}Mn_{0,02}Hg_{0,86}Te$ : а) криві 1 — без УЗ, 2 — при УЗ обробці,  $W_{US}=0,1$  Вт/см<sup>2</sup>, 3 —  $W_{US}=0,5$  Вт/см<sup>2</sup>, 4 —  $W_{US}=1$  Вт/см<sup>2</sup>; б) 1 — без УЗ, 2- при УЗ обробці,  $W_{US}=0,5$  Вт/см<sup>2</sup>; в) 1 — без УЗ, 2 — при УЗ навантаженні,  $W_{US}=0,5$  Вт/см<sup>2</sup>.

ті, а відповідно і  $T_{in}$ , для даних матеріалів визначаються вихідною концентрацією легуючої домішки і структурою електрично-активних власних дефектів кристалічної ґратки. Механізм впливу УЗ обробки на властивості кристалів  $CdMnHgTe$ , як і на  $CdHgTe$ , пов'язаний з взаємодією УЗ хвилі з дислокаціями кристалу. В результаті інтенсивного коливання дислокацій відбувається УЗ інтенсифікація дифузійних процесів внутрішнього легування об'єму матеріалу надлишковими атомами ртуті, зв'язаними на дислокаціях, а також — перерозподіл вихідних (власних) точкових дефектів [3]. Важливо нагадати, що ці процеси відбуваються лише локально, в околі самих дислокацій. Дійсно, вимірювання  $R_H$  (зі зміною  $T$  або  $W_{US}$ ) при УЗ навантаженні проводяться при відносно низьких температурах і протягом короткого часу. Тобто, величина коефіцієнта дифузії атомів Hg низька і при АС генерації пари (міжвузловинний атом Hg — вакансія Hg) її компоненти на час дії УЗ залишаються на близькій відстані; а після вимкнення УЗ відбувається їх рекомбінація і за короткий час характеристики зразка повертаються до попереднього стану. Таким чином, УЗ дія в кристалах  $CdMnHgTe$  приводить до зсуву  $T_{in}$ , як у бік низьких, так і високих температур, і дозволяє отримати зміни як зворотні, так і незворотні, що відкриває широке поле застосування таких акустичувливих сенсорів. Оскільки існує певна аналогія між ефектами УЗ впливу та радіаційного ( $\gamma$ - та нейтронного) опромінення,

то подібний ДХ на основі  $CdMnHgTe$  можна також використовувати і для діагностики радіаційних полів.

В кристалах кремнію теж спостерігалася конверсія типу провідності при УЗ навантаженні. Кристали Si, які використовувались для досліджень, спочатку були нейтронно-опромінені, а потім відпалені при 330°C. Слід зазначити, що в процесі радіаційного опромінення, утворюється цілий спектр радіаційних дефектів (дивакансії, А- та Е-центри, та інші метастабільні й бістабільні комплекси). Традиційною операцією відновлення електрофізичних характеристик напівпровідникового матеріалу, який містить термодинамічно нерівноважні дефекти (в тому числі і радіаційної природи), є термообробка. Але операція відпалу має також і недоліки, наприклад, утворення термодифектів. Дійсно, багато дефектів кристалу в умовах їх діагностики можуть знаходитись у зв'язаному стані (наприклад на дислокаціях, комплексах і т.д.) і бути електрично- і фотоелектрично неактивними. Застосування УЗ навантаження в процесі різноманітних фізичних досліджень суттєво розширює методичні можливості діагностики напівпровідникових матеріалів і приладів на їх основі. Як видно із рис.4, УЗ дія спочатку призводить до деякої немонотонної зміни  $R_H(T)$ , а зі збільшенням  $W_{US}$  і до конверсії типу провідності в певному температурному діапазоні. У той же час, у вихідних кристалах, а також у невідпалених нейтронно-опроміненних

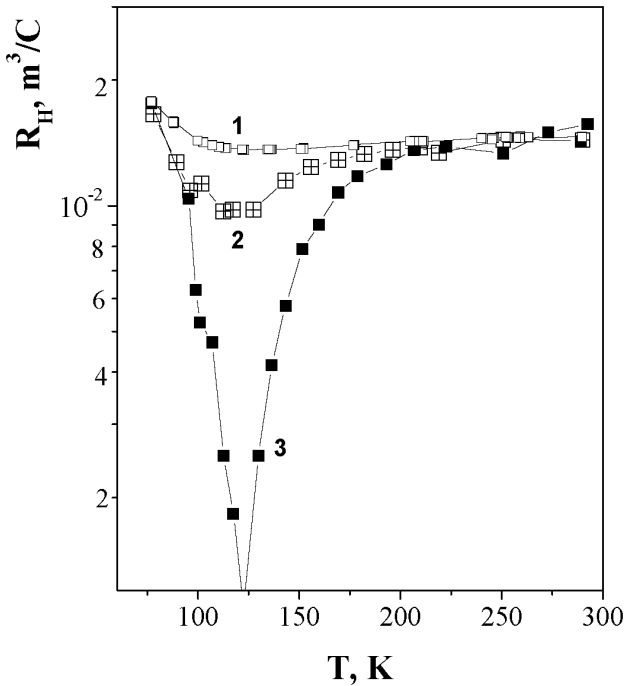


Рис. 4.  $R_H(T)$  в нейтронно-опромінену та відпаленому при  $330^\circ\text{C}$  Si при УЗ навантаженні: 1 — вихідний зразок, без УЗ); 2 — при УЗ навантаженні,  $W \leq 0,5 \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-2}$ ); 3 — при УЗ навантаженні,  $W > 1 \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-2}$ .

зразках, АС зміни електрофізичних характеристик не спостерігалися. Тобто, появу конверсії типу провідності у відпалених радіаційно-опромінені кристалах можна пояснити АС активацією електрично-неактивних дефектів, які перебували в зв'язаному стані на складних комплексах радіаційних дефектів. УЗ зсув  $T_{in}$  в бездислокаційних кристалах визначається АС змінами рухливості та концентрації носіїв струму відповідно. Фізичними причинами таких змін є динамічні (миттєві — під час дії УЗ) АС реакції асоціації-дисоціації електрично-активних дефектів, що супроводжуються процесами захоплення (звільнення) електронів.

Для порівняльної оцінки ефективності сенсорів на основі розглянутих вище матеріалів (Ge і CdMnHgTe) визначимо їхню чутливість до УЗ дії  $S_{US}$ , взявши частинну похідну по  $W_{us}$ :

$$S_{US} = \frac{\partial U_H}{\partial W_{us}} = c \left( \frac{\partial R_H}{\partial T} \right) \left( \frac{\partial T}{\partial W_{us}} \right). \quad (2)$$

Враховуючи, що  $c \left( \frac{\partial R_H}{\partial T} \right) = S_T$ , а при температурах близьких до  $T_{in}$  другий множник  $\left( \frac{\partial T}{\partial W_{us}} \right)$  можна замінити на  $\left( \frac{\partial T_{in}}{\partial W_{us}} \right)$ , — отримуємо:

$$S_{US} = S_T \left( \frac{\partial T_{in}}{\partial W_{us}} \right). \quad (3)$$

В лінійному наближенні  $\left( \frac{\partial T_{in}}{\partial W_{us}} \right) = k$  (рис. 5) і  $S_{US} = k \cdot S_T$ . На рис.5 приведені експериментальні зміни  $T_{in}$  в залежності від  $W_{us}$  для зразків Ge і CdMnHgTe (криві 1 і 2, відповідно). Видно, що крутизна характеристики  $\frac{\partial T_{in}}{\partial W_{us}}$  для кристалів CdMnHgTe значно (в  $\sim 5$  разів) більша ніж для кристалів Ge (крива 1), що вказує на вищу чутливість CdMnHgTe до дії УЗ. Зауважимо, що в такому наближенні із експериментальних залежностей  $\Delta U_H(W_{US})$  можна визначати амплітуду УЗ безпосередньо в процесі електрофізичних вимірювань.

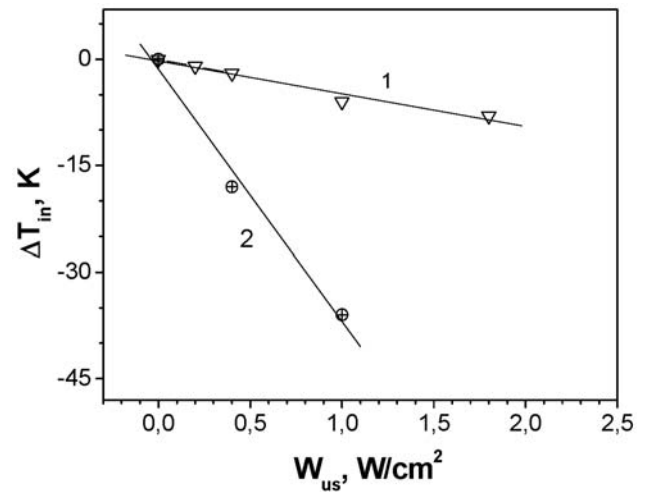


Рис. 5. Експериментальні зміни  $T_{in}$  в залежності від  $W_{us}$  для зразків Ge і  $\text{Cd}_{0,12}\text{Mn}_{0,02}\text{Hg}_{0,86}\text{Te}$  (криві 1 і 2, відповідно).

Таким чином, висока чутливість акустичного сенсора може бути реалізована при температурах максимально близьких до  $T_{in}$  на основі "гігантської" крутизни характеристики  $R_H(T)$  в області інверсії навіть при низькій інтенсивності УЗ дії. Певними перевагами даного датчика є можливість широкого вибору як об'ємних, так і плівкових напівпровідникових матеріалів, які характеризуються змішаною провідністю та наявністю  $T_{in}$ .

Робота виконувалася при частковій фінансовій підтримці УНТЦ, проєкт №3643.

### Література

1. Фистуль В.И. Введение в физику полупроводников. — М.: Высш. школа, 1975. — 296 с.
2. Оліх Я.М., Савкіна Р.К. Акустостимульований зсув температури інверсії знака коэф.Холла у РЛ кристалах Ge // УФЖ. — 1997. — Т.42. — № 11-12. — С. 1385-1389.
3. Оліх Я.М., Остапов С.Е., Тимочко М.Д. Вплив

ультразвукової обробки на електрофізичні вла-  
стивості монокристалів CdMnHgTe // УФЖ. —  
2005. — Т.50. — № 10. — С. 1145-1151.

4. Оліх Я.М., Тимочко Н.Д., Долголенко А.П.

Акустостимулированное преобразование ради-  
ационных дефектов в  $\gamma$ -облученных кристаллах  
кремния n-типа // ПЖТФ. — 2006. — Т.32. —  
Вып.13. — С. 67-73.