ФІЗИКА І ХІМІЯ ТВЕРДОГО ТІЛА
Т. 11, № 1 (2010) С. 72-76

PHYSICS AND CHEMISTRY OF SOLID STATE
V. 11, № 1 (2010) P. 72-76

УДК 621.315.592; 534.222.1; 548.4

ISSN 1729-4428

Р.К. Савкіна[1], О.Б. Смірнов[1], С.О. Юр'єв[2], С.І. Ющук[2], В.І. Лобойко[2]

Ультразвукова інфрачервона термографія вузькощілинного напівпровідника $Cd_xHg_{1-x}Te$ (x ~ 0,2)

[1]*Інститут фізики напівпровідників НАН України ім. В.Є. Лашкарьова, м. Київ, пр. Науки, 45, Україна*
[2]*Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, вул. Ст. Бандери, 12, Україна*

Запропоновано спосіб термічної візуалізації макроскопічних областей протяжних дефектів вузькощілинного напівпровідника $Cd_xHg_{1-x}Te$ (x ~ 0,2), де в якості джерела розігріву застосовується високочастотний (МГц) ультразвук, енергія якого поглинається вибірково на дислокаціях та малокутових границях в залежності від частоти коливань. Це явище викликає різницю температур між матрицею та областями структурної недосконалості, яка є достатньою для спостереження випромінювальної здатності E_s матеріалу та може стати основою неруйнівного методу активної ІЧ термографії напівпровідникових матеріалів.

Ключеві слова: дефекти, інфрачервона томографія, неруйнівний контроль, вузькощілинний напівпровідник

Стаття поступила до редакції 08.09.2009; прийнята до друку 15.12.2009.

Вступ

Для виявлення дефектів в напівпровідникових кристалах зазвичай застосовують метод селективного травлення [1], який, однак, є руйнівним і погіршує фізичні властивості досліджуваного матеріалу. Інший спосіб ґрунтується на залежності оптичних характеристик (світлорозсіювальної здатності і коефіцієнта поглинання) від наявності в кристалі структурних дефектів [2], але він дає лише інтегральну оцінку якості без деталізації дефектності.

Широко вживаним методом виявлення дефектних частин будь-яких матеріалів є інфрачервона (ІЧ) термографія, до переваг якої відносять швидкодію, неруйнівний та безконтактний характер, відносну легкість інтерпретації результатів, наявність добре розвинутої техніки детектування, тощо [3]. Методи ІЧ термографії розділяють на пасивні, коли досліджується природний температурний контраст, та активні – коли температурний контраст створюється за допомогою додаткового розігріву об'єкта дослідження. Представлений нами спосіб виявлення дефектних частин напівпровідникових кристалів може бути віднесений до методів активної термографії, де в якості джерела додаткового розігріву об'єкта дослідження застосовуються високочастотні (*МГц*) ультразвукові (*УЗ)* коливання, енергія яких поглинається вибірково саме на протяжних дефектах структури матеріалу [4].

I. Теоретичне обґрунтування методу інфрачервоної термографії для виявлення дефектів в напівпровідникових кристалах

Розповсюдження акустичної хвилі (АХ) в реальному кристалі є випадком неоднорідної деформації в неоднорідному об`єкті. Частина пружної енергії АХ переходить в тепло, а амплітуда коливань зменшується. Внаслідок цього в кристалі виникають поздовжні та поперечні теплові потоки. Крім того, у відповідності з механізмом акустодислокаційної взаємодії мають місце втрати звукової енергії поблизу макроскопічних дефектів, що рухаються в полі АХ і відбувається інтенсивне тепловиділення на дислокаціях, малокутових границях, міжкристалітних границях в полікристалах, тощо.

Розглянемо дислокації як лінійні джерела тепла, які здійснюють коливальний рух при розповсюдженні в кристалі акустичної хвилі частотою f_{US}. За половину періоду АХ $\tau_{US} = (2f_{US})^{-1}$ відбувається стискання та розігрів матриці поблизу таких дефектів. Час релаксації акустично стимульованого розігріву можна оцінити з допомогою виразу $\tau_R = d^2/\pi^2 D_T$, де d – середня по кристалу відстань між дислокаціями, D_T – температуропровідність кристала. Якщо виконується

умова $\tau_{US} < \tau_R$, то за півперіод розповсюдження АХ теплова рівновага встановитися не встигає. Отже, на фоні середньої температури матриці навколо дислокації відбувається розігрів певного об'єму кристала.

Розподіл температури у межах області розігріву має вигляд [5]:

$$T(x,z) = T_0 + \frac{W_0}{2\pi\chi} \cdot \exp\left(\frac{x}{R_0}\right) \cdot K_0\left(\frac{r}{R_0}\right); \quad (1)$$

$$r = \left(x^2 + z^2\right)^{1/2},$$

де W_0 – енергія, що розсіюється одиницею довжини дислокації за одиницю часу, $R_0 = 2\chi / C\rho\upsilon_{dis}$ – стаціонарний радіус розігріву дислокації, χ, C, ρ – відповідно теплопровідність, теплоємність та густина матеріалу матриці, υ_{dis} – швидкість руху дислокацій, T_0 – середня рівноважна температура по кристалу, K_0 – модифікована функція Бесселя нульового порядку.

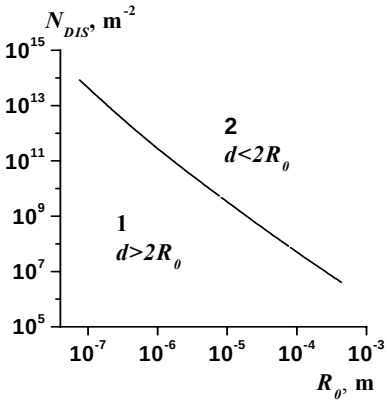
Якщо в кристалі густина та розподіл структурних дефектів такі, що виконується умова перекриття областей розігріву навколо сусідніх дислокацій, а саме, $d < 2R_0$, то акустичне навантаження приведе до макроскопічного розігріву областей підвищеної дефектності. Таким чином, існування дислокацій, що виступають джерелами постійного розігріву, може бути візуалізовано.

II. Експериментальні результати діагностики напівпровідникових кристалів $Cd_xHg_{1-x}Te$ (x = 0,0 ÷ 0,2)

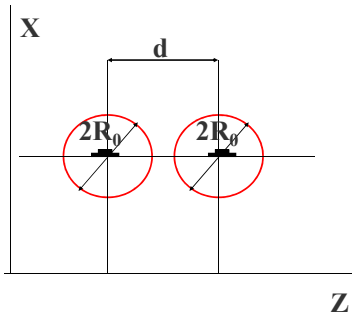
Запропонований метод був застосований для діагностики напівпровідникових кристалів $Cd_xHg_{1-x}Te$ (x = 0,0 ÷ 0,2) (КРТ) – базового матеріалу для створення фотоприймачів, що працюють в області довжин хвиль (8 ÷ 14) мкм [6]. Відомо, що вирощування однорідних за складом, структурно досконалих монокристалів КРТ, придатних для виготовлення приладів, виявляється проблемним через утворення надлишку Te у розплаві, накопичення якого приводить до коміркового росту та утворення включень в цьому матеріалі. Крім того, нестабільність дефектної системи, що обумовлена слабкістю хімічного зв`язку в підгратці Hg-Te, та низький поріг пластичності також сприяють утворенню великої кількості ростових та післяростових структурних дефектів. Тому КРТ є зручним модельним матеріалом для такого дослідження.

З урахуванням значення температуропровідності цього матеріалу $D_T \sim 10^{-9}$ *м²/с* характеристичний час релаксації акустично стимульованого розігріву області навколо дислокації становить $\tau_R = (10^{-3} \div 10^{1})$ *с*. Отже, при акустичному навантаженні монокристалів КРТ саме у *МГц* частотному діапазоні виконується умова $\tau_{US} < \tau_R$ існування теплових джерел постійного розігріву.

Наведемо деякі оцінки, взявши значення густини дислокацій N_{dis} монокристалів КРТ у межах ($10^8 \div 10^{10}$) $м^{-2}$. Відповідно, середня по монокристалу відстань між дислокаціями буде дорівнювати $d = N_{dis}^{-0,5} = (10^{-4} \div 10^{-5})$ *м*. Оцінка радіуса області розігріву навколо дислокації в монокристалі КРТ дає значення $R_0 \sim 10^{-4}$ *м*. Тобто, для всіх значень параметрів реалізується умова дискретного розподілу лінійних теплових джерел $d<2R_0$ (рис. 1). Розподіл



а



б

Рис. 1. а) Області дискретного (1) та неперервного (2) розподілу теплових джерел на прикладі кристала $Cd_xHg_{1-x}Te$; б) схематичне зображення двох сусідніх дислокацій: d – відстань між дислокаціями, R_0 – радіус області розігріву.

дислокацій в кристалах $Cd_xHg_{1-x}Te$ зазвичай є нерівномірним. Таким чином, ділянки кристала з густиною структурних дефектів $N_{dis} \geq 10^{11}$ $м^{-2}$ будуть розігріватися макроскопічно.

Макроскопічний неоднорідний розігрів монокристалів КРТ в присутності УЗ коливань потужністю ~ 0,5 *Вт/м²* був зареєстрований експериментально за допомогою декількох термопар, розташованих на поверхні зразка [6]. Він становив (10 ÷ 20) К в залежності від ступеня структурної досконалості досліджуваного кристала та відповідав величині теоретичної оцінки розігріву.

Необхідно відзначити, що ефективність запропонованого способу виявлення дефектних частин напівпровідникового кристала певною мірою залежить від ефективності поглинання акустичної енергії. Раніше нами було встановлено, що якщо частота УЗ навантаження близька до власної частоти

коливань субблочної структури КРТ, то відбувається суттєва зміна параметрів кристала внаслідок резонансної взаємодії ультразвуку та малокутових границь [7]. Отже, з огляду на резонансний характер поглинання ультразвуку в кристалі з протяжними дефектами цікавим є вивчення частотної залежності акустично стимульованого розігріву.

Оскільки будь-яке розігріте тіло випромінює електромагнітну енергію, а здатність непрозорої поверхні випромінювати характеризується випромінювальною здатністю, ми дослідили величину та спектральний розподіл випромінювальної здатності монокристалічного $Cd_xHg_{1-x}Te$ ($x \sim 0{,}2$), розігрітого шляхом УЗ навантаження, в залежності від частоти АХ. Спектральна залежність фотовідгуку досліджуваного зразка (СМТ–03) наведена на рис. 2. Густина

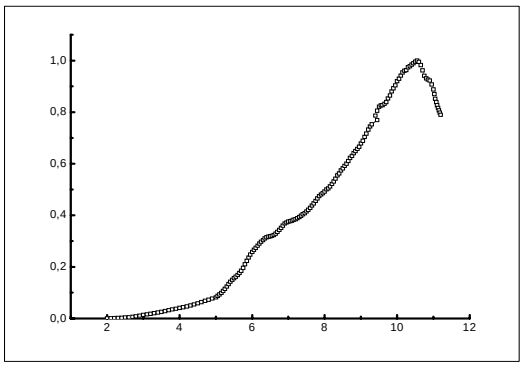


Рис. 2. Спектральний розподіл фотовідгуку зразка СМТ–03, T = 78 К.

протяжних дефектів зразка становила відповідно $\sim 10^9$ $м^{-2}$ для дислокацій та ~ 5000 $м^{-1}$ для малокутових границь.

III. Методика реєстрації випромінювальної здатності напівпровідникових кристалів $Cd_xHg_{1-x}Te$

Методика реєстрації випромінювальної здатності була розроблена, виходячи з двох основних властивостей теплових потоків випромінювання порожнин – незалежності та адитивності [8,9]. Зразок напівпровідника розміщувався у спеціальній металевій камері, яка мала зачорнену внутрішню поверхню та знаходилася в азотному кріостаті у щільному тепловому контакті з ним. Система УЗ навантаження підсилювалася шляхом демпфування металізованого алюмінієм п'єзоперетворювача на основі ЦТС кераміки металізованим кварцовим буфером, на поверхні якого за допомогою акустичного мастила закріплялася пластина напівпровідника. Випромінювання через отвір у камері - порожнині виводилося назовні діатермічно через ZnSe вікно кріостату, піддавалося модуляції за допомогою механічного дискового переривача з частотою $f_{mod} = 20$ *Гц* і подавалося на вхід ІЧ спектрометра SPM-2, де на виході розміщувався піроелектричний датчик ПМ-4 на основі танталату літію (без чорніння, з ІЧ германієвим вхідним просвітленим вікном). Вихідне вікно кріостата по апертурі було співмірним з розмірами оптичної щілини спектрометра.

Сигнал з ПМ-4 реєструвався через підсилювач нановольтметром типу УНИПАН за методом синхронного детектування. Змінний сигнал S_s на виході детектора є пропорційним до різниці потоків теплового випромінювання від зразка (індекс *s*), еталона (індекс *et*) і модулятора (індекс *m*) та може бути поданий у вигляді [9]:

$$S_s = K \cdot [E_s W_s + (R_s + T_s) \cdot W_{et} - E_m W_m - R_m W_{et}], \quad (2)$$

де *K* – деяка функція, що залежить від спектральних характеристик спектрометра та детектора, *E* – відносна випромінювальна здатність, *W* – потік теплового випромінювання, *R* і *T* – коефіцієнти відбивання та пропускання, відповідно. Роль еталона (чорного тіла) виконувала зачорнена камера, у якій знаходився зразок при температурі рідкого азоту 78 *K*, яка контролювалася за допомогою Ge термометра типу ТПК з точністю 0,05 *K*.

З урахуванням правила Кірхгофа ($E + R + T$) = 1 рівність (2) може бути зведена до вигляду:

$$S_s = K \cdot [E_s \cdot (W_s - W_{et}) - E_m \cdot (W_m - W_{et})]. \quad (3)$$

Оптимізація матеріалу модулятора (*Al* фольга), потужності та тепловідводу електричного двигуна (≤ 0,1 Вт) виключила попадання тепла як від самого двигуна, так і від дискового модулятора в оптичну та, відповідно, реєструючу системи. Перевірка при відсутності вимірюваного зразка ($E_s = 0$) не виявила додаткового сигналу, або ж він знаходився на рівні шумів. Таким чином, другим доданком ($W_m - W_{et}$) у рівності (3) можна знехтувати. Остаточно для S_S отримуємо вираз:

$$S_s = K \cdot E_s \cdot (W_s - W_{et}). \quad (4)$$

Для чорного тіла:

$$S_{ч.т.} = K(W_s - W_{et}). \quad (5)$$

Комбінуючи (4) і (5), отримуємо кінцевий вираз, з якого виходить, що за такою методикою при наявності різниці температур між зразком та еталоном - камерою азотного кріостата, безпосередньо реєструється відносна випромінювальна здатність зразка:

$$E_s = S_s / S_{ч.т.} \quad (6)$$

Експериментальні спектри відносної випромінювальної здатності зразка СМТ–03 наведено на рис. 3. Частотна залежність інтегральної величини випромінювальної здатності зразка СМТ–03 наведена на рис. 4. На ній спостерігаються два максимуми – при частотах 5 та 8 *МГц*, які відповідають підвищенню температури зразка, тобто збільшенню різниці температур між досліджуваним зразком та камерою азотного кріостата. Природа першого максимуму зрозуміла, оскільки він відповідає резонансній частоті п'єзоперетворювача.

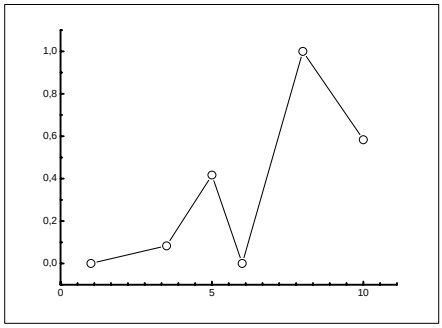


Рис. 3. Спектральний розподіл відносної випромінювальної здатності зразка СМТ–03, розігрітого ультразвуком з частотою: 1 – 5 МГц; 2 – 8 МГц.

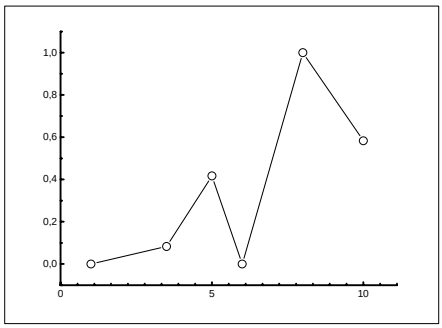


Рис. 4. Частотна залежність інтегральної величини випромінювальної здатності зразка СМТ–03 при T = 78 K.

В цьому випадку відбувається дисипація УЗ енергії у відповідності з класичним механізмом взаємодії дислокацій з акустичною хвилею, що розповсюджується в кристалі. Другий максимум імовірно пов'язаний з резонансною взаємодією ультразвуку та малокутових границь, оскільки частота АХ є близькою до власної частоти субблочної структури досліджуваного зразка $f_R = \upsilon_{US} / 2L_{\text{lab}} \sim 8{,}5$ *МГц*, де $L_{\text{lab}}=(N_{\text{lab}})^{-1}$ – середній розмір субблока, N_{lab} – густина малокутових границь, $\upsilon_{\text{US}} = 3{,}4\cdot10^3$ *м/с* – швидкість акустичної хвилі в $Cd_xHg_{1-x}Te$.

Висновок

Таким чином, в роботі запропоновано та реалізовано спосіб термічної візуалізації недосконалостей структури вузькощілинного напівпровідникового монокристала за допомогою УЗ розігріву протяжних дефектів, що викликає різницю температур між матрицею та областями структурної недосконалості, яка є достатньою для спостереження випромінювальної здатності матеріалу та може стати основою неруйнівного методу активної ІЧ термографії напівпровідникових матеріалів.

Савкіна Р.К. – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник;
Смірнов О.Б. – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник;
Ющук С.І. – доктор технічних наук, професор кафедри фізики;
Юр'єв С.О. – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики;
Лобойко В.І. – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики.

[1] РМ 11 050.028-77. Приборы полупроводниковые и микросхемы интегральные. Пластины кремниевые. Метод выявления дефектов на поверхности пластин высокотемпературным окислением.
[2] Е.М. Гамарц, А.И. Дернятин. Оптический метод контроля структурно–примесной неоднородности кремниевых пластин // *Электронная техника. Сер. Управление качеством, стандартизация, метрология, испытания.* 3 (126). сс. 14-19 (1987).
[3] X. Maldague. *Theory and Practice of Infrared Technology for Non Destructive Testing, John-Wiley & Sons.* p. 684 2001.
[4] Р.К. Савкіна, О.Б. Смірнов, С.О. Юр'єв, С.І. Ющук. *Спосіб виявлення дефектних частин напівпровідникових кристалів.* Патент України на корисну модель № 31098 від 25.03. 2008 р.
[5] Г. Карслоу, Д. Егер. *Теплопроводность твердых тел:* пер. с англ. Наука, М. 435 с. (1964).
[6] R.K. Savkina, A.B. Smirnov A.B. Temperature rise in crystals subjected to ultrasonic influence // *Infrared Physics & Technology*, **46**. pp. 388-393 (2005).
[7] Р.К. Савкіна, О.Б. Смірнов, С.О. Юр'єв. Про кореляцію між акустично стимульованим відгуком та ступенем структурної досконалості твердих розчинів $Cd_xHg_{1-x}Te$ // *ФХТТ,* **5**(1), сс. 401-405 (2004).
[8] С.П. Русин, В.Э. Пелецкий. *Тепловое излучение полостей. Энергоатомиздат.* М. 152 с. (1987).
[9] Оптические свойства полупроводников (полупроводниковые соединения типа $A^{III}B^{V}$) под. ред. Р. Уиллардсона и А. Бира. «Мир», М. 488 с. (1970).

R.K. Savkina[1], O.B. Smirnov[1], S.O. Yuryev[2], S.I. Yushchuk[2], V.I. Loboiko[2]

The Ultrasonic Thermography of Narrow Band Semiconductor of $Cd_xHg_{1-x}Te$ ($x \sim 0,2$)

[1] "V.E. Lashkaryov" *Institute of Semiconductor Physics of the National Academy of Sciences, 45, Nauki avenue, Kyiv, Ukraine*
[2]*National University "Lvivs'ka Polytechnica", 12, Bandery Str. Lviv, Ukraine*

The method of thermal visualization of macroscopic areas of the prolonged defects of narrow band semiconductor of $Cd_xHg_{1-x}Te$ (x ~ 0,2) is offered, where in quality the source of warming-up a high-frequency (MHz) ultrasound energy of which is taken in preferentially on distributions and low-angle boundary depending on frequency of vibrations is used. This phenomenon causes the difference of temperatures between a matrix and areas of structural imperfection which is sufficient for the supervision of a radiate ability of E_s of material and can become basis of non-destructive method of active infrared thermography of semiconductor materials.

Key words: defects, infrared thermography, non-destructive method, narrow band semiconductor