УДК 546.711.49

© 2005 р. В.В. Жихаревич, С.Е. Остапов

Чернівецький національний університет ім. Ю.Федьковича, Чернівці

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМІВ РОЗСІЯННЯ НОСІЇВ ЗАРЯДУ У ВУЗЬКОЩІЛИННИХ КРИСТАЛАХ НА ОСНОВІ HgCdTe

Розраховано температурну залежність рухливості носіїв струму у вузькощілинних напівпровідникових твердих розчинах на основі КРТ з шириною забороненої зони E_g≈0,1 еВ і малою концентрацією домішок. Отримано добре узгодження теоретичних розрахунків з експериментальними даними (максимальна похибка не перевищує 10%). Зроблено висновки про доцільність врахування тільки двох механізмів розсіяння: на іонізованих домішках та полярних оптичних фононах, а також про подібність характеру температурної залежності рухливості у діапазоні 77÷300 К.

This paper deals with the calculation of the temperature dependence of mobility in narrow-gap semiconductors on the base of HgCdTe with the energy gap about 0,1 eV and small impurities concentration. As the result of the investigations we conclude that the accounting only two scattering mechanisms (ionized impurities and polar optic phonons) leads to a good agreement with experimental data in the temperature range 77-300 K. The conclusion is very common for all investigated materials.

Сьогодні кристали $Hg_{1-x}Cd_xTe$ (КРТ) і багатокомпонентні сполуки на їх основі є основними напівпровідниковими матеріалами для виготовлення детекторів ІЧ-випромінювання у широкому спектральному діапазоні 1÷14 мкм, особливо у довгохвильовому вікні 8÷14 мкм [1]. Ці матеріали мають низку надзвичайних фізичних властивостей: плавну залежність ширини забороненої зони від хімічного складу, малу ефективну масу електронів та їх високу рухливість, можливість зміни концентрації носіїв як *p*-, так і *n*-типу провідності у широких межах ($10^{14}<n, p<10^{18}$ см$^{-3}$). Велика рухливість носіїв заряду дозволяє створювати достатньо швидкодіючі прилади [2].

Основним недоліком КРТ є слабкість хімічного зв'язку Hg–Te, яка призводить до великої кількості вакансій ртуті та створює проблеми із забезпеченням стабільної поведінки поверхонь і границь розділу у структурах [3]. Зазвичай вказані проблеми частково можна розв'язати за допомогою сучасної технології, однак вартість матеріалу, що отримується при цьому, багатократно зростає.

Отже, залишається актуальним пошук шляхів поліпшення стабільності та однорідності кристалів КРТ або синтез його аналогів з більш досконалою і стабільною кристалічною граткою. Досягнення цієї мети можливе шляхом уведення у твердий розчин елементів із меншим, ніж у КРТ, іонним радіусом, що зумовить стабілізацію кристалічного зв'язку Hg–Te. Такими ізовалентними елементами, зокрема, є Mn та Zn, іонні радіуси яких 1,39 Å та 1,3 Å значно менші, ніж у кадмію – 1,56 Å [4].

Поява нових, альтернативних до КРТ, матеріалів, таких як HgMnTe (МРТ), HgCdMnTe (КМРТ), HgCdMnZnTe (КМЦРТ), ставить задачу вивчення їх основних параметрів і порівняння їх між собою.

Один із основних параметрів носіїв заряду – рухливість. Велика рухливість дозволяє виготовляти швидкодіючі прилади. В цьому сенсі дослідження механізмів розсіяння носіїв заряду – важлива фізична і технічна задача.

В даній роботі проведені дослідження температурних залежностей рухливості носіїв заряду в діапазоні 77÷300 К (тобто у найбільш важливій, з точки зору приладів, області) з урахуванням розсіяння на полярних оптичних фононах та іонізованих домішках.

Дослідження механізмів розсіяння

Добре відомо [5], що основними механізмами розсіяння носіїв заряду, які діють у КРТ із шириною забороненої зони при T=77 К E_g≈0,1 еВ, є розсіяння на іонізованих домішках та полярних оптичних фононах. Істотним також вважають розсіяння на потенціалі розупорядкування, однак в роботі [6] показано, що в твердих розчинах типу

КРТ, що містять марганець, цей вид розсіяння носіїв можна вважати неістотним. Тому ми вважали, що при низьких температурах домінуючим є розсіяння на іонізованих домішках, а при кімнатних (область власної провідності) – на полярних оптичних фононах.

Для розрахунків рухливості при розсіянні носіїв заряду на іонізованих домішках було використано формулу Брукса-Херрінга [5]:

$$\mu_i = \frac{2^{7/2}\kappa^2(4\pi\varepsilon_0)^2(k_0T)^{3/2}}{\pi^{3/2}N_i e^3(m^*)^{1/2}\ln y}, \qquad (1)$$

де $\ln y = \ln(1+b) - b/(1+b)$. Параметр b у не вироджених напівпровідниках:

$$b = \frac{6\kappa(4\pi\varepsilon_0)m^*(k_0T)^2}{\pi n\hbar^2 e^2},$$

у випадку виродження:

$$b = \frac{2\kappa(4\pi\varepsilon_0)k_0T}{e^2}\left(\frac{\pi}{3n}\right)^{1/3}.$$

Тут κ – діелектрична проникність кристалу, N_i – концентрація іонізованих домішок, n – концентрація вільних носіїв струму.

Розсіяння на полярних оптичних фононах враховувалось за допомогою формули, отриманої Еренрайхом [7]:

$$\mu_{op} = \frac{\sqrt{2}\hbar(k_0T)^{1/2}M\upsilon_\alpha\omega_l}{3\pi e e_c^*(m^*)^{3/2}}\times$$
$$\times\left(e^{\hbar\omega_l/k_0T}-1\right)F_{1/2}^{-1}\left(\frac{\zeta}{k_0T}\right)G_1\left(\frac{\zeta}{k_0T},\frac{\hbar\omega_l}{k_0T}\right), \qquad (2)$$

де e_c^* – ефективний заряд іонів, що відображає долю гетерополярного вкладу в хімічний зв'язок гратки, M – приведена маса атомів кристала, υ_α – об'єм елементарної комірки кристала, ω_l – частота поздовжніх оптичних коливань гратки, ζ – енергія Фермі, що відраховується від дна зони провідності, $F_{1/2}$ – інтеграл Фермі, G_1 – функція, значення якої знаходяться в інтервалі 0,6–1.

Припущення відносно діючих механізмів розсіяння потребує обгрунтування, тому нами були виконані розрахунки рухливості з врахуванням дії розсіяння на іонізованих домішках і полярних оптичних фононах окремо та проведено зіставлення з експериментом для КМЦРТ.

Як ми бачимо (рис. 1), наші припущення відносно домінуючих механізмів розсіяння виявились правильними, що дає право використовувати даний підхід також й до інших кристалів із приблизно рівною шириною забороненої зони.

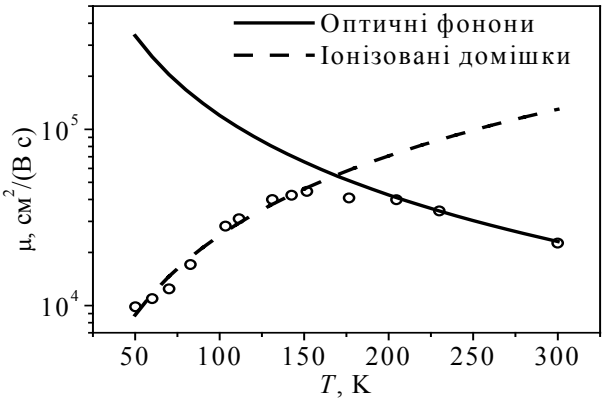

Рис.1. Результати розрахунків рухливості для різних механізмів розсіяння в порівнянні з експериментом для КМЦРТ

Розрахунок рухливості носіїв заряду з використанням формул (1) та (2) було проведено для зразків $Hg_{1-x}Mn_xTe$, $Hg_{1-x-y}Cd_xMn_yTe$ та $Hg_{1-x-y-z}Cd_xMn_yZn_zTe$ різного складу і концентрації домішок. Набір експериментальних даних для порівняння з теоретичними кривими було вибрано зі зразків, для яких концентрація акцепторних домішок складала 10^{15}–10^{16} см$^{-3}$, а донорних – 10^{15} см$^{-3}$. Такі матеріали, незважаючи на те, що концентрація акцепторів більша, ніж донорів, мають провідність n-типу за рахунок великої електронної рухливості у порівнянні з дірковою (в даних матеріалах $\mu_n/\mu_p \approx 100$). Це дає нам право враховувати тільки електрони провідності і знехтувати впливом дірок.

В цьому випадку також спостерігається досить добре узгодження теоретичних розрахунків з експериментальними даними (максимальна похибка не перевищує 10%).

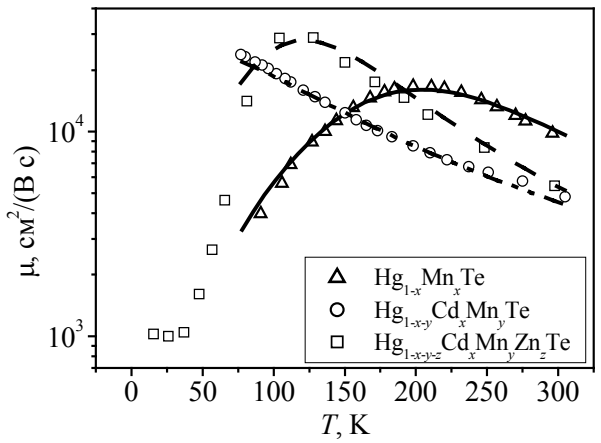

Рис. 2. Температурна залежність рухливості: $Hg_{1-x}Mn_xTe$ (x=0,091, Na=1,7·10^{16}см$^{-3}$); $Hg_{1-x-y}Cd_xMn_yTe$ (x=0,1, y=0,027, Na=3·10^{15} см$^{-3}$); $Hg_{1-x-y-z}Cd_xMn_yZn_zTe$ (x=0,14, y=0,014, z=0,01, Na= =5·10^{15} см$^{-3}$). Для всіх зразків прийнято Nd=10^{15} см$^{-3}$

Отже, порівняно проста теоретична модель та ряд припущень, наведених вище, дозволяють досить коректно описувати температурну залежність рухливості у досліджуваних матеріалах, що мають ширину забороненої зони E_g≈0,1 еВ.

Висновки

1. Температурна залежність рухливості у вузькощілинних напівпровідникових твердих розчинах $Hg_{1-x}Mn_xTe$, $Hg_{1-x-y}Cd_xMn_yTe$ та $Hg_{1-x-y-z}Cd_xMn_yZn_zTe$, що мають ширину забороненої зони E_g≈0,1 еВ (T≈77 К) та невелику концентрацію домішок, може бути описана за допомогою розсіяння на іонізованих домішках та полярних оптичних фононах.

2. Виходячи з отриманих результатів, можна стверджувати, що досліджувані матеріали мають схожу поведінку температурної залежності рухливості носіїв заряду у діапазоні температур 77÷300 К.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Triboulet A.* Alternative small gap materials for IR detection // Semicond. Sci. Technol. – 1990. – **5**. – P.1073-1079.
2. *Rogalski A.* Infrared detectors: an overview // Infrared Physics & Technology. – 2002– **43**. – P.187-210.
3. *Vydynath H.R.* Lattice defects in narrow-gap semiconductors HgCdTe alloys // J. Electrochem. Soc. – 1981. – P.2609-2619.
4. *Rogalski A.* $Hg_{1-x}Mn_xTe$ as a new infrared detector material // Infrared Phys. – 1991. – **31**. – P.117.
5. *Scott W., Stelzer E., Hager J.* Electrical and far-infrared optical properties of p-type HgCdTe // J. Apl. Physics. – 1976. – **47**, No.4. – P.1408-1414.
6. *Несмелова И.М.* Оптические свойства узкощелевых полупроводников. – Новосибирск: Наука, 1992.
7. *Маделунг О.* Физика полупроводниковых соединений элементов III и V групп. – М.: Мир, 1967.