

© 2002р. П.М. Ткачук, А.М. Раранський, Я.М. Струк, В.І. Ткачук,
О.А. Політанська

Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, Чернівці

ВИСОКОЧУТЛИВИЙ Х-ДЕТЕКТОР НА ОСНОВІ МОНОКРИСТАЛІВ CdTe <Ge>

Запропоновано модель локальної перебудови кристалічної ґратки в околі домішкового атома Ge, що пояснює високе значення X-чутливості монокристалів *p*-CdTe<Ge> при наявності амбіполярної X-провідності.

Explanation of the high X-ray sensibility of *p*-CdTe <Ge> single crystals with ambipolar X-conductivity on the base of the local crystal lattice reconstruction model nearby the atom of Ge dope is offered.

Телурид кадмію є перспективним матеріалом для створення на його основі неохолоджуваних детекторів з метою реєстрації та спектрометрії X- та гамма-квантів в діапазоні енергій 1÷1000 кеВ [1]. Однак серійне виробництво сенсорів X-випромінювання на основі CdTe до цього часу не налагоджене, на відміну від детекторів типу ДРМ-2 на основі CdS [2], котрі використовуються в експонетрах промислових рентгенівських апаратів. Збільшення конкурентної спроможності CdTe-детекторів може забезпечуватись поряд з поліпшенням інших характеристик підвищенням X-чутливості (ХЧ) робочої речовини.

Один із методів підвищення ХЧ телуриду кадмію – введення в кристалічну ґратку взаємокомпенсуючих домішок [2]. В цьому аспекті цікавим є легування CdTe домішкою, що має властивість заміщення атомів компонентів сполуки в обох підґратках.

В даній роботі досліджено вплив амфотерної домішки Ge на ХЧ та інші характеристики монокристалів CdTe, що використовуються як активні елементи детекторів X-випромінювання.

Методику вирощування монокристалів CdTe і CdTe <Ge> з розплаву методом Бріджмена при низьких значеннях тиску кадмію ($p_{Cd} < p_{min} \approx 20$ кПа) описано в роботі [3]. Інтегральну оцінку досконалості кристалічної структури та однорідності досліджуваних зразків проводили шляхом порівняння значень напівширини кривих гойдання $\theta_{експ}$, отриманих експериментально методом двокристалного X-спектрометра, з теоретично розрахованим значенням $\theta_{розра}$, а також методом

селективного травлення. Для зразків величини $\theta_{експ}$ (відбивання 220) склали 18-22", які близькі до теоретично розрахованого значення для досконалого кристала CdTe ($\theta_{розра} \approx 17,5''$). Густина дислокацій становила $(2 \div 4) \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$.

Заготовки робочих елементів детекторів розмірами $2 \times 2 \times 1 \text{ мм}^3$ для вимірювання ХЧ та прямокутні бруски $8 \times 2 \times 1 \text{ мм}^3$ для вимірювання ефекту Хола вирізували з середньої частини монокристалічних зливків CdTe і CdTe <Ge> *p*-типу провідності. Омичні контакти на зразки наносили методом хімічного осаду міді з наступною напайкою індієм. Зразки вмикали за схемою фоторезистора, збудження X-провідності здійснювали Cr, Fe, Cu і MoK_{α} - випромінюванням, що перекриває діапазон енергій $E=5,4-17,5$ кеВ. Вимірювання проводили при кімнатній температурі і робочій напрузі 75 В. Методика вимірювань аналогічна описаній у [3]. Величина ХЧ (R) виражалась відношенням додаткового струму в зразку до потужності дози X-випромінювання і відносилась до одиниці прикладеної напруги.

Таблиця 1. Концентрація вільних дірок, питомий опір, X-чутливість кристалів CdTe з різним вмістом домішки германію.

$N, \text{см}^{-3}$	$p, \text{см}^{-3}$	$\rho, \text{Ом см}$	$R, \text{А} \cdot \text{с}^3 / \text{м}^2$
–	$1,56 \cdot 10^{13}$	$5,0 \cdot 10^3$	0,23
$3,0 \cdot 10^{15}$	$7,0 \cdot 10^{12}$	$1,0 \cdot 10^4$	2,56
$1,0 \cdot 10^{16}$	$6,0 \cdot 10^9$	$1,0 \cdot 10^7$	0,38
$3,0 \cdot 10^{16}$	$5,0 \cdot 10^8$	$1,0 \cdot 10^8$	0,24
$7,0 \cdot 10^{16}$	$1,0 \cdot 10^8$	$2,0 \cdot 10^8$	0,18

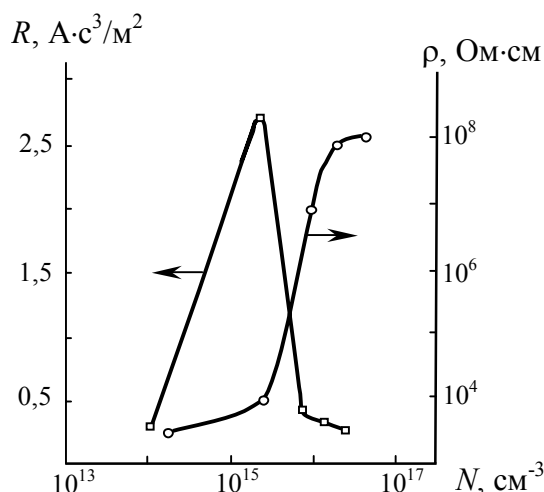


Рис.1. Концентраційні залежності X-чутливості (ліва шкала) і питомого опору (права шкала) монокристалів CdTe <Ge> p-типу провідності. $T=300$ К.

Деякі електрофізичні параметри та результати вимірювання X-чутливості зразків з різним складом домішки германію подано в таблиці 1. Для зручності обговорення дані таблиці 1 зображено на рис.1. Звертає на себе увагу різке збільшення значення R при концентрації домішки $N=3,0 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, що приблизно на порядок вище від ХЧ детекторів ДРМ-2.

Для визначення механізму ХЧ необхідно знати конфігурацію домішки германію в кристалічній ґратці сполуки, визначити особливості її взаємодії з іншими точковими дефектами, а також з'ясувати процеси, стимульовані X-випромінюванням.

Як видно з рис.1, при $N=N_{\text{кр}}$ відбувається стрибкоподібне збільшення ρ . В роботі [4] таку поведінку електропровідності пояснено так. При досить низьких значеннях p_{Cd} у процесі вирощування кристалів і при $N < N_{\text{кр}}$ домішкові атоми Ge займають вакансії в підґратці кадмію, причому припускається формування асоціатів типу $(\text{Ge}^+ V_{\text{Cd}}^-)^0$ або $(\text{Ge}^+ V_{\text{Cd}}^{2-})^-$. Однозарядний комплекс $(\text{Ge}^+ V_{\text{Cd}}^{2-})^-$ може при цьому відігравати роль r -центра з великим $(S_p = 6,0 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2)$ і малим $(S_n = 5,0 \cdot 10^{-19} \text{ см}^2)$ перерізами захоплення дірки і електрона відповідно. При не дуже низьких значеннях p_{Cd} і $N > N_{\text{кр}}$ атоми Ge розташовуються в обох підґратках, а матеріал переходить у напівізолюючий стан, який зумовлюється взаємодією домішок через кристалічну ґратку [5]. Для високоомних монокристалів CdTe <Ge> (як p -, так і n -типу провідності) характерна наявність глибокого рівня $E_v + 0,5 \div 0,7$ еВ.

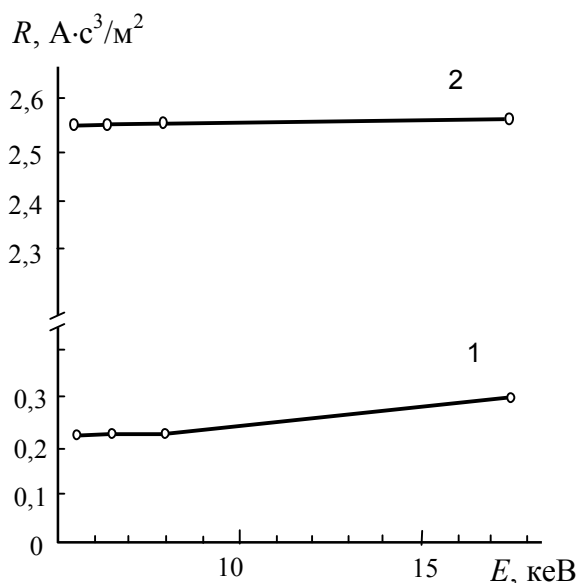


Рис.2. Спектральні залежності X-чутливості зразків CdTe (1), CdTe <Ge> ($N=3,0 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$) (2). $T=300$ К.

Характерно, що порівняно з низькоомними зразками в спектрах фотолюмінесценції високоомних кристалів не виявляються лінія A^0 , X (1,5883 еВ) та смуга B (1,5497 еВ), обумовлені V_{Cd} , що можна пов'язати з вищевказаним механізмом впровадження домішки – розміщенням атомів Ge на місцях вакансій підґратки Cd при низьких значеннях p_{Cd} . Крім цього, відсутність в області енергій 1,4-1,5 еВ випромінювання, зумовленого комплексами донор- V_{Cd} (A -центри), говорить не на користь припущення про можливість комплексоутворення типу $(\text{Ge}^+ V_{\text{Cd}}^{2-})^-$. Можна вважати, що при $N > N_{\text{кр}}$ всі V_{Cd} заповнені атомами Ge.

Зображена на рис.1 залежність R від N засвідчує, що її максимум розташовується в області $N < N_{\text{кр}}$, тобто механізм підвищення ХЧ не зумовлюється наявністю взаємокомпенсуючих домішок германію в обох підґратках. Більше того, він не залежить від енергії X-квантів, враховуючи лінійний характер залежності R від E (рис.2, крива 2). На наш погляд, можуть мати місце такі явища перебудови ґратки в околі атома германію. Донорну поведінку домішки Ge_{Cd} забезпечують два обірваних зв'язки сусіднього атома Te, який за певних умов може вийти з вузла, утворюючи френкелеву пару $V_{\text{Te}} - \text{Te}_i$. Відомо [5], що в присутності вільних носіїв заряду ймовірність теплового народження дефекта Френкеля, особливо поблизу атома домішки, досить висока. Слід відзначити, що, згідно з літературними даними,

V_{Te} утворює мілкий донорний ($E_c - 0,035$ eV [6]), а Te_i - більш глибокий акцепторний рівні ($E_c - 0,06$ eV [7] або $E_v + 0,15$ eV [8] у залежності від зарядового стану).

Ми не беремо до уваги можливість Х-стимульованого утворення дефектів Френкеля, враховуючи незначні енергії Х-квантів. Так, наприклад, енергія електрона, необхідна для зміщення атомів Cd або Te в область міжвузловини CdTe, складає 340-350 keV [9]. Водночас в умовах експерименту може стимулюватись процес активації мілких дефектів (елементів пар Френкеля у тому числі). При цьому слід чекати, що число нерівноважних електронів в зоні провідності (постачаються V_{Te}) по порядку величини відповідає концентрації нерівноважних дірок у валентній зоні (постачаються незаповненими однозарядними V_{Cd}). У цьому випадку амбіполярної провідності суттєвою є характерна для кристалів CdTe відмінність значень рухливості носіїв заряду (μ_e/μ_d)>10 [1], що призводить до підвищення ХЧ більш, ніж на порядок. Максимум ХЧ детекторів визначається таким оптимальним домішково-дефектним складом робочої речовини, який при концентрації $N < N_{кр}$ і наявності вільних дірок, що постачаються вакансіями кадмію, забезпечує формування максимальної кількості пар $V_{Te}-Te_i$. При значеннях $N > 3,0 \cdot 10^{15}$ см⁻³ ХЧ різко падає в результаті заповнення атомами Ge як V_{Cd} , так і V_{Te} . При цьому поява ізольованих атомів Te_i може спричинити випромінювання лінії A^0 , X (1,5910 eV) в спектрах екситонної фотолюмінесценції.

Отже, вказана модель конфігурації центру Ge_{Cd} в ґратці CdTe пояснює механізм високої Х-чутливості сполуки при $N < N_{кр}$, що створює умови для розробки конкурентноспроможного Х-детектора резистивного типу.

Автори висловлюють подяку професору Савицькому А.В. за сприяння в проведенні експериментів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Акимов Ю.К., Игнатъев А.И., Калинин А.И., Кушнирук В.Ф. Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике. М.: Энергоатомиздат, 1989.
2. Анищенко В.А., Астахов В.Н., Вялый Н.Г., Пашун А.Д. Рентгенопроводимость монокристаллов твердых растворов $(CdTe)_x(GaAs)_{1-x}$ // Изв. АН СССР. Неорганические материалы. -1983. - 19, №5. - С.722-725.
3. Савицкий А.В. Получение и физические свойства теллурида кадмия. - Киев: УМК ВО, 1990.
4. Товстюк К.Д. Полупроводниковое материаловедение. - Киев: Наук. думка, 1984.
5. Виницкий В.Л., Холодарь Г.А. Статистическое взаимодействие электронов и дефектов в полупроводниках. - Киев: Наук. думка, 1969.
6. Иванов В.С., Стопачинский В.Б., Чапнин В.А. Дифференциальная спектроскопия локальных центров в CdTe // ФТП. -1971. - 5, №1. - С. 101-105.
7. Lorenz M.R., Segall B. Shallow and deep acceptors states in CdTe // Phys. Lett. -1963. - 7, No.1. - P.18-20.
8. Kröger F.A. The defect structure of CdTe// Rev. Phys. Appl. - 1977. - 12, No.2. - P.205-210.
9. Баранский П.И., Клочков В.П., Потыкевич И.В. Полупроводниковая электроника. Справочник. - Киев: Наук. думка, 1975.