

ЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТЕЛУРИДУ КАДМІЮ, ЛЕГОВАНОГО ЗАЛІЗОМ

Наведено результати експериментальних досліджень електричних властивостей CdTe:Fe з концентраціями $N_{\text{Fe}}=10^{18}\text{-}5\cdot 10^{19}\text{ см}^{-3}$. У межах *n*-шару відпалених ($T=1174\text{ К}$, $P_{\text{Cd}}=2,24\cdot 10^5\text{ Па}$) зразків має місце однорідний розподіл по товщині шару глибоких донорів і неоднорідний – мілких. Зразки з концентрацією $N_{\text{Fe}}\approx 2\cdot 10^{18}\text{ см}^{-3}$ після відпалу мають стабільні характеристики.

The results of experimental investigations into electrical properties of CdTe:Fe with the concentrations of $N_{\text{Fe}}=10^{18}\text{-}5\cdot 10^{19}\text{ cm}^{-3}$ have been given. Within the *n*-layer of annealed ($T=1174\text{ K}$, $P_{\text{Cd}}=2,24\cdot 10^5\text{ Pa}$) samples there is a homogeneous distribution of deep donors and inhomogeneous distribution of shallow donors across the layer thickness. The annealed samples with the concentration of $N_{\text{Fe}}\approx 2\cdot 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ have stable characteristics.

Кристали CdTe, леговані залізом з концентраціями $N_{\text{Fe}}=10^{18}\text{-}5\cdot 10^{19}\text{ см}^{-3}$, володіли дірковою провідністю ($\mu_p=30\text{-}59\text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$) і за концентрацією носіїв заряду не відрізнялись від чистого CdTe, вирощеного в аналогічних умовах. Це підтверджує виражену раніше думку про електричну неактивність домішки заліза в CdTe [1].

Відпалені зразки CdTe:Fe у поперечному перерізі являли собою неоднорідну структуру з низькоомним поверхневим шаром (*n*-тип), товщиною 200-800 мкм і високоомним (*i*) об'ємом. У рамках моделі, запропонованої в роботі [2], існують мілкі донори D_1 і глибокі – D_2 . Мілкі донори зумовлені міжвузловими атомами кадмію Cd_i у першому зарядовому стані [3,4]. Оскільки домінуючими домішками у матеріалі є міжвузловий Cd і Fe, то можна допустити наявність комплексоутворення за участю одного з дефектів, якщо навіть один із центрів знаходиться у нейтральному стані і відповідає за рівень D_2 . У легованих зразках CdTe:Fe спостерігалось зменшення швидкості дифузії Cd, що можна пояснити, виходячи з того, що дифузія Cd проходить по вакансіях, зайнятих атомами заліза. Методом мічених атомів із використанням Fe^{55+59} було встановлено деяке збільшення концентрації домішки Fe в *n*-області відпалених зразків [5].

У межах *n*-шару має місце досить однорідний розподіл за товщиною шару глибоких донорів і неоднорідний – мілких донорів (або компенсуючих акцепторів). Це встановлено шляхом послі-

довного зняття шарів (крок 50 мкм) і вимірюванням температурної залежності R (рис.1). Виявилось, що величина $R = R^{\text{eф}} S_H / S$ ($R^{\text{eф}}$ – експериментальне значення коефіцієнта Холла для однорідного зразка, S_H і S – площі поперечного перерізу низькоомного шару і всього зразка) практично не змінюється в області високотемпературного насичення зі зменшенням товщини шару і суттєво зростає в області температур, де зонні електрони зумовлені мілкими донорами.

Відомо [4], що при використаних умовах відпалу, концентрація електронів, спричинена Cd_i сягає $5\cdot 10^{17}\text{ см}^{-3}$. У відпаленому CdTe:Fe сумарна концентрація іольованих Cd_i і комплексів D_2 не перевищує 10^{16} см^{-3} . Наявність домішки Fe дещо знижує розчинність Cd, але не на два порядки. З іншого боку, температурна залежність рухливості

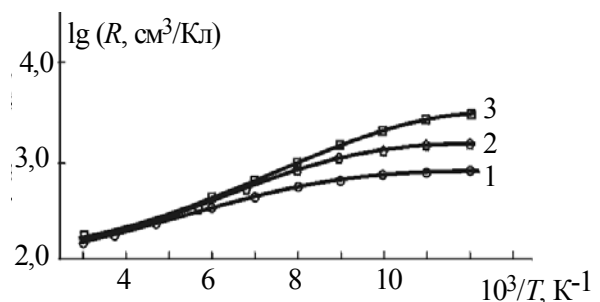


Рис. 1. Температурна залежність коефіцієнта Холла для зразка з послідовним зменшенням *n*-шару. Зменшення товщини *n*-шару йде від кривої 1 до кривої 3 з кроком 50 мкм.

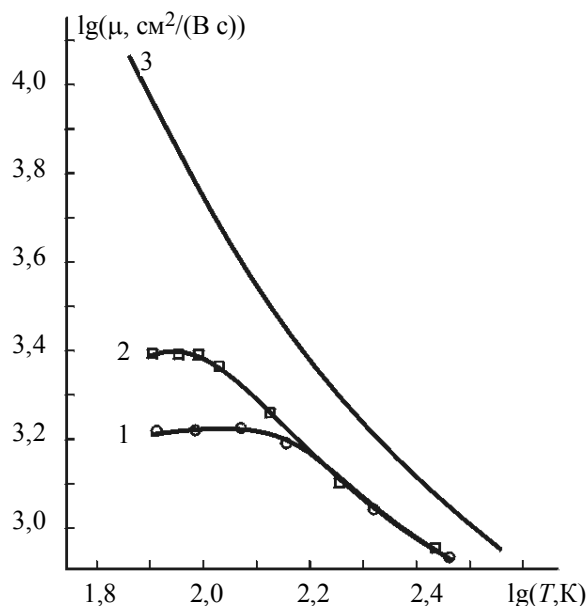


Рис. 2. Температурна залежність рухливості CdTe, легованого Fe (1, 2) і теоретична крива, з урахуванням розсіювання на теплових коливаннях ґратки (3).

носіїв заряду зразків (рис.2) свідчить про те, що концентрація ізольованих розсіюючих центрів істотно нижча від 10^{17} см^{-3} , але водночас має місце додатковий механізм розсіювання, що приводить до загального зменшення рухливості електронів, зумовленого розсіюванням на неоднорідностях [6].

Дослідження *i*-області зразків CdTe:Fe, відпалених протягом 120 годин при температурі 1174 К і $P_{\text{Cd}}=2,24 \cdot 10^5 \text{ Па}$ з різними концентраціями заліза показали, що для зразків із $N_{\text{Fe}} \approx 10^{19} \text{ см}^{-3}$ *i*-область була *p*-типу з питомим опором $\rho=10^4 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ і $\mu_p=25 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ (I), а для зразків з $N_{\text{Fe}} \approx 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ *i*-область була *n*-типу провідності з $\rho=10^{10} \text{ Ом}\cdot\text{см}$ і $\mu_n=50 - 100 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ (II). Питомий опір і рухливості дані при кімнатній температурі.

Різний тип провідності і питомий опір *i*-областей для концентрації заліза $N_{\text{Fe}} \approx 10^{19} \text{ см}^{-3}$ і $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ при однакових умовах відпалу свідчить про те, що чим більша концентрація заліза, тим менша швидкість дифузії Cd в об'єм зразка, який забезпечує перехід зразка з низькоомного *p*-типу у високоомний *p*-тип або *n*-тип.

На рис.3 показана температурна залежність коефіцієнта Холла зразків I. Характерною особливістю таких зразків є те, що в них вже при 333 К проходять процеси, які поволі змінюються з часом і приводять до нестабільності параметрів таких зразків, аналогічно чистому CdTe [7]. Після прогріву такого зразка до температури $\sim 400 \text{ К}$ питомий опір його збільшився. Із температурної

залежності $\lg R$ був визначений рівень з енергією іонізації $\epsilon=0,47 \text{ еВ}$.

Зразки *n*-типу (II) (рис.4) мали два нахили температурної залежності R з енергією іонізації $\epsilon_1=0,41 \text{ еВ}$ і $\epsilon_2=0,82 \text{ еВ}$, визначені із залежності $\lg(RT^{3/2})$. При нагріванні такого зразка до температури 433К одержуємо відтворювані результати при вимірюванні δ та i .

Аналіз викладених результатів свідчить про те, що при температурному відпалі і під тиском пари кадмію проявляються глибокі рівні $\epsilon_1=0,41 \text{ еВ}$ і $\epsilon_2=0,82 \text{ еВ}$, які, швидше за все, мають комплексну природу. Утворення комплексів теоретично передбачено у роботі [8], а також підтверджуються магнітними і електричними вимірюваннями, проведеними в [5].

Для підтвердження ідеї про те, що домішка заліза при температурній обробці в парі кадмію сприяє стабілізації параметрів CdTe, було проведене його дифузійне легування. Вихідні зразки були *p*-типу провідності, $\mu_p=60 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ при 300 К. Після дифузії Fe впродовж 45 годин при

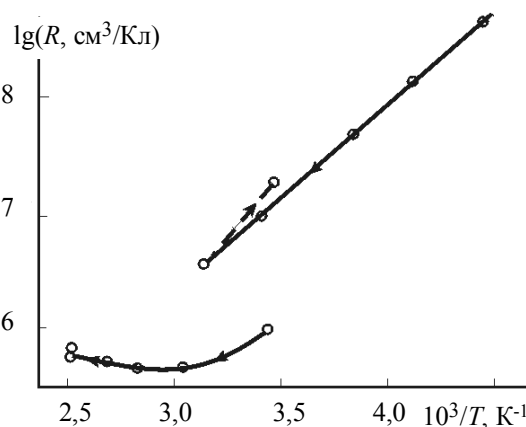


Рис. 3. Температурна залежність коефіцієнта Холла для *i*-області зразка CdTe:Fe (I). $N_{\text{Fe}} \approx 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

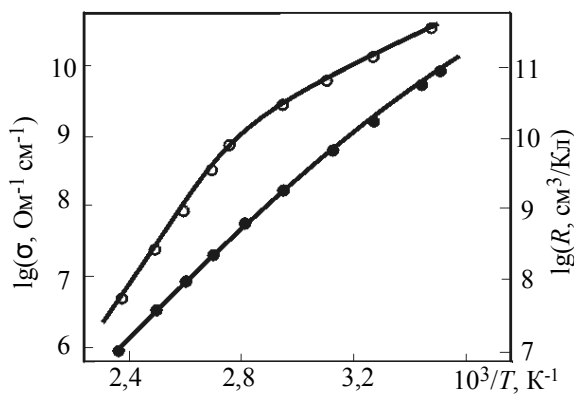


Рис. 4. Температурна залежність електропровідності і коефіцієнта Холла для *i*-області зразків CdTe:Fe (II). $N_{\text{Fe}} \approx 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

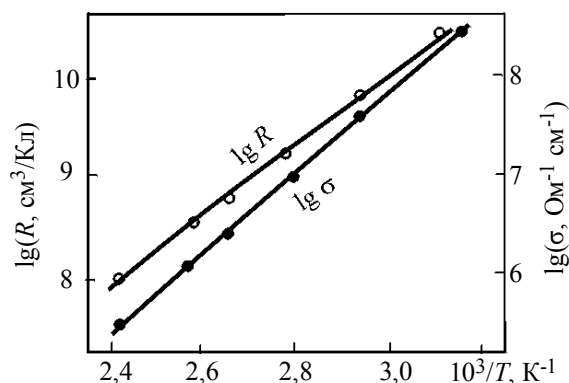


Рис.5. Температурна залежність електропровідності і коефіцієнта Холла для i -області зразків CdTe:Fe (II). $N_{Fe} \sim 2 \cdot 10^{18} cm^{-3}$.

температурі 1100 К одержали матеріал n -типу провідності $\mu_n = 100 cm^2/(V \cdot s)$, який володів стабільними характеристиками майже до 423 К. Із залежності $lg(RT^{3/2})$ був визначений рівень з енергією іонізації $\epsilon = 0,65 eV$ (рис.5).

Отже, як і у випадку CdTe, легованого германієм [7,9], ми одержуємо CdTe, легований залізом, що володіє стабільними характеристиками. Схильність домішки Fe до комплексоутворення з власними дефектами CdTe засвідчує, що найбільш імовірною природою глибоких центрів є їх комплексна природа.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Вул Б.М., Иванов В.С., Рукавишников В.А., и др. Свойства теллурида кадмия, легированного железом // ФТП. - 1972. - **6**, №7. - С.1264-1267.
2. Савицкий А.В., Никонюк Е.С., Иванчук Р.Д., и др. Электрические свойства ожеженных кристаллов CdTe:Fe // ФТП. - 1977. - **11**, №6. - С.1173-1176.
3. D. de Nobel Phase balance and semiconductor properties of cadmium tellurium // Phillips Res. Repts. - 1959. - **14**. - P.430-492.
4. Медведев С.А., Максимовский С.Н., Клевков Ю.В., Шапкин П.В. Синтез и направленная кристаллизация теллурида кадмия при контролируемом отклонении от стехиометрии / Теллурид кадмия. - М.: Наука, 1968 - С.7-12.
5. Иванчук Р.Д. Исследование влияния примесей группы железа на физические свойства теллурида кадмия: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. - Черновцы, 1977. - 18 с.
6. Weisberg L.W. Anomalous mobility effects in some semiconductors and insulators // J.Appl. Phys. - 1962. - **88**, No.33. - P.1817-1921.
7. Никонюк Е.С., Матлак В.В., Иванчук, Савицкий А.В. Температурная зависимость электропроводности и эффекта Холла в CdTe // Физическая электроника. - 1971. - вып. 3. - С.8-14.
8. Болотов В.В., Васильев А.В., Смирнов Л.С. Реакции в кристаллах как фактор, определяющий процессы диффузии // ФТП. - 1974. - **8**. - С.1175-1181.
9. В.В. Матлак. Исследование состояния дефектов в теллуриде кадмия: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. - Черновцы, 1973. - 19 с.