

УДК 539.3:539.21

Вплив ступеня пасивації воднем електричних центрів на роздільну здатність оптичного запису зображень на *n-p-i-m* наноструктурах

Британ В.Б., Пелещак Р.М., Шунтар Д.Д., Штим В.С.

email: vbrytan@yandex.ru

кафедри загальної фізики, Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка, вул. Стрийська, 3, Дрогобич, Львівська обл., 82100

У межах електростатично-деформаційної моделі досліджено вплив ступеня пасивації електричних центрів у CdTe, $Cd_xZn_{1-x}Te$ гідроеном на роздільну здатність оптичного запису зображень на *n-p-i-m* наноструктурах

Ключові слова: атомарний водень, енергія взаємодії, електричні центри, роздільна здатність.

ВСТУП

Напівпровідники CdTe, ZnTe та тверді розчини на їх основі ($Cd_{1-x}Zn_xTe$) представляють значний інтерес з технологічної точки зору, завдяки використанню їх в оптоелектроніці (матеріал як фоторефрактивний, так і для створення електрооптичних модулаторів, детекторів γ -променів і x -променів, робочі елементи для оптичних реєструючих середовищ на *n-p-i-m* наноструктурах [1]).

Наявність в таких монокристалах електрично-активних центрів (вакансії, міжвузлові атоми, акцепторні та донорні домішки), зумовлених термодинамічними особливостями їх вирощування, приводить до порушення симетрії хімічних зв'язків. Тобто, до формування в забороненій зоні напівпровідника домішкових енергетичних рівнів, положення та структура яких приводить до зменшення реєструючого детекторного заряду.

Не менш важливе є значення темного струму, яке визначається концентрацією електрично-активних центрів (ЕАЦ), оскільки темновий струм є основним джерелом електронного шуму і відповідає за зниження роздільної енергетичної здатності. У темновий струм дає вклад як об'ємний, так і поверхневий струм витікання. Одним із методів зниження рівня дефектності і

покращення оптичних, електричних властивостей зразків CdTe ($Cd_{1-x}Zn_xTe$) зменшення об'ємного струму витікання та покращення ефекту запису зображень на оптично-реєструючих напівпровідникових наноструктурах виду *n-p-i-m* є воднева пасивація (ЕАЦ) у напівпровідникових матеріалах CdTe ($Cd_{1-x}Zn_xTe$), які є робочими елементами в оптично реєструючих напівпровідникових приладах. Така пасивація технологічно здійснювалась в результаті імплантації водню або обробки кристалу у газовому розряді атмосфери водню [2].

Для вибору оптимальних технологічних умов пасивації електричних центрів атомарним воднем у CdTe ($Cd_{1-x}Zn_xTe$) необхідно знати їх механізми та вплив на роздільну здатність оптичного запису зображення. Тому ця робота присвячена дослідженню механізмів пасивації ЕАЦ атомарним воднем у межах електростатично-деформаційної моделі та їх вплив на якість оптичного запису зображень.

1. ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОЩУВАННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ РОБОЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДЛЯ ОПТИЧНО-РЕЄСТРУЮЧИХ MIS-НАНОСТРУКТУР

Монокристали телуриду кадмію *p*-типу з концентраціями акцепторів

$N_A = (10^{16} \div 10^{18}) \text{ cm}^{-3}$ були вирощені методом сублімації в атмосфері водню [2]. Зразки отримувалися шляхом сколювання вирощених монокристалів телуриду кадмію та їх твердих розчинів по площинах типу [110], із яких струнною різкою вирізали їх у формі прямокутного паралелепіпеда. Бокові зрізи шліфувалися абразивною емульсією з розміром зерна 5 мкм, після чого зразки полірували хіміко-механічним способом у 5 %-му розчині бром у метанолі з наступною промивкою в метанолі з високим ступенем чистоти.

Дифузія водню в зразки проводилась в газовому розряді водню при кімнатній температурі. Зразок знаходився у боковому відростку ампули з наповненою воднем при тиску 0.025 мм. рт. ст. і виведеними електродами. До електродів прикладалось високочастотна (3 кГц) напруга, за рахунок якої відбувався газовий розряд.

2. ЕЛЕКТРОСТАТИЧНО-ДЕФОРМАЦІЙНА МОДЕЛЬ ПАСИВАЦІЇ

Існуючі моделі пасивації (метод хімічних реакцій та електростатичний) не охоплюють випадки, коли легуючі донорні або акцепторні домішки та атоми водню в кристалічній матриці створюють неоднорідну деформацію кристалічної ґратки. Крім електростатичної взаємодії між іонізованими атомами водню H^+ або нейтральним H^0 та акцепторами існує ще взаємодія через деформаційне поле. Особливо це має місце коли іонний (ковалентний) радіус легуючої домішки заміщення відрізняється від іонного радіуса атома матриці. Деформаційна складова механізму пасивації змінить умови відпаду напівпровідникового кристала.

Енергія взаємодії $V(\vec{r})$ між акцептором і атомарним воднем визначається двома складовими: електростатичною $V_{el-st}(\vec{r})$ (в межах екранованого електростатичного потенціалу) та пружною $V_{def}(\vec{r})$ (в межах деформаційного потенціалу [3]):

$$V(\vec{r}) = V_{el-st}(\vec{r}) + V_{def}(\vec{r}), \quad (1)$$

де

$$V_{el-st}(\vec{r}) = - \frac{e^2 \exp \left[- \frac{r}{\sqrt{\frac{k_b T \varepsilon \varepsilon_0}{e^2 (N_A + N_H)}}} \right]}{4 \pi \varepsilon \varepsilon_0 r} \quad (2)$$

$$V_{def}(\vec{r}) = - \frac{1}{24 \pi} C_{44} \left(1 + 2 \frac{C_{12}}{C_{11}} \right) \xi \Delta V_A \Delta V_H \times \times \frac{1}{r^3} \left(3 - 5 \sum_{x=1}^3 n_{rx}^4 \right), \quad (3)$$

$$\vec{n}_r = \frac{\vec{r}}{r}, \quad \xi = \frac{C_{11} - C_{12} - 2C_{44}}{C_{44}} \quad - \text{параметр}$$

пружної анізотропії кубічного кристалу, e – заряд електрона, T – температура кристалу, k_b – стала Больцмана, C_{ij} ($i, j = 1-4$) – пружні сталі, $\Delta V_A, \Delta V_H$ – зміна об'єму кристалічної ґратки за наявності домішок акцепторів та атомарного водню відповідно. Останній вираз у формулі (3) визначає орієнтаційну залежності енергії взаємодії. Для кристалографічних напрямів [100], [110], [111] він приймає значення відповідно $-2, \frac{1}{2}, \frac{4}{3}$, тобто при $\xi < 0$ однакові дефекти, розміщені вздовж осі [100], притягуються деформаційною взаємодією, а вздовж осі [110] або [111] – відштовхуються. Тому пружна взаємодія приводить до переважаючої орієнтації пар віддалених однакових точкових дефектів у кристалографічних напрямках виду [100]. Рівноважна відстань між акцептором і атомарним воднем визначалась з умови мінімуму енергії $V(\vec{r})$ (1).

3. СХЕМА ОПТИЧНОГО ЗАПИСУ ІНФОРМАЦІЇ

На сьогоднішній день в якості швидкодіючих оптичних реєструючих середовищ запропоновані середовища на MIS структурах з тонким нанорозмірним шаром діелектрика талія (ТІ) товщиною 2 нм - 5 нм, (М(ТІ)S-наноструктури) [1], де в якості напівпровідникового елемента беруть високоомний телурид кадмію (CdTe), $\rho = 10^7 \text{ Om} \cdot \text{cm} - 10^8 \text{ Om} \cdot \text{cm}$ (рис. 1. а).

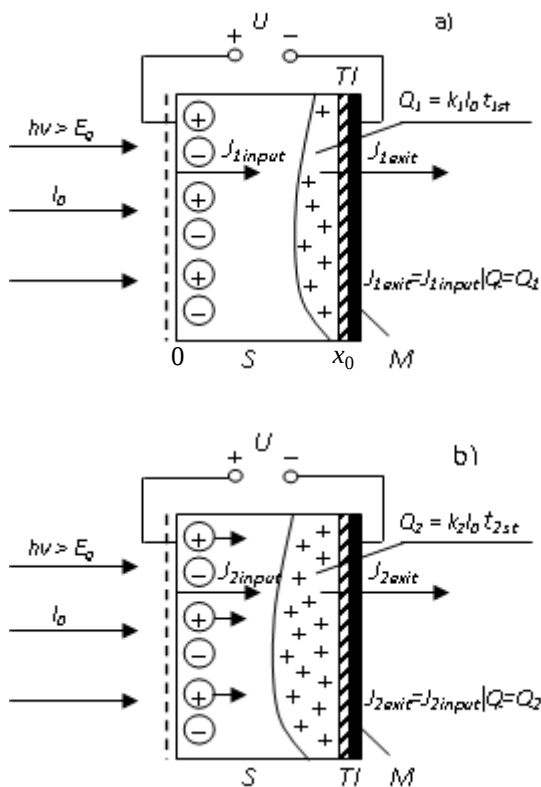


Рис.1. Схема оптичного запису інформації на напівпровідникових структурах метал-діелектрик-напівпровідник S (CdTe, Cd_{1-x}Zn_xTe) з нанометровим шаром діелектрика, TI – діелектрик талія, M – метал

- а) – непасивований (CdTe, Cd_{1-x}Zn_xTe);
б) – пасивований (CdTe:H, Cd_{1-x}Zn_xTe:H).

Одним із способів отримання високоомних монокристалів є вирощування або відпал їх в атмосфері водню (CdTe:H). Це у свою чергу приводить до пасивації електрично-активних центрів (вакансій, міжвузлових атомів), тобто до зменшення їхньої концентрації. Тоді при дії світла на робочий напівпровідниковий елемент (CdTe:H) збільшується в ньому концентрація вільних носіїв заряду, тобто збільшується на електродах реєструючий детекторний заряд Q_2 (рис. 1.б.) відносно заряду Q_1 , який виникає при дії світла в непасивованому напівпровідниковому елементі CdTe (рис. 1.а.). Заряд Q_1 зібраний на електродах структури з непасивованим напівпровідниковим елементом (CdTe) при проходженні заряду $q_1(x)$, створеним у кристалі довжиною $L = x_2 - x_1$ квантами поглинутого зчитуючого світла ($h\nu \geq E_g^{CdTe}$ –

ширина забороненої зони), знаходимо із наступного співвідношення [4,5]

$$Q_i(x) = \frac{q_i(x)}{L} dx, \quad Q_i(x_1, x_2) = \frac{1}{L} \int_{x_1}^{x_2} q_i(x) dx. \quad (4)$$

де $i = 1, 2$ – для непасивуючого і пасивуючого робочих напівпровідникових елементів відповідно.

При освітленні структури зчитуючим світлом зі сторони від'ємного електроду заряд через непасивований (пасивований) напівпровідниковий кристал CdTe переноситься електронами, при цьому величина q буде зменшуватися з часом за експоненціальним законом

$$q_i(t) = q_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right), \quad (5)$$

де τ_i ($i = 1, 2$) – часи життя носіїв (електронів) у непасивованому монокристалі CdTe (рис.1.а) та пасивованому CdTe:H (рис. 1.б), t – час з моменту генерації заряду.

Час t і координата x носіїв заряду зв'язана співвідношенням:

$$dt = \frac{dx}{V_{idr}(x)} = \frac{dx}{\mu_i E_i(x)}; \quad (6)$$

де $V_{idr}(x)$, μ_i , $E_i(x)$ – дрейфові швидкості, рухливості носіїв заряду та напруженості електричного поля непасивованого і пасивованого напівпровідникового робочого елемента відповідно. Перерозподіл напруги U між кристалом і нанорозмірним шаром діелектрика при освітленні практично відсутні, тобто

$$\int_0^L E_i(x) dx = U, \quad (7)$$

Із виразів (4) – (7) отримаємо вирази для величини заряду, зібраного на електродах структури від створеного одним квантом світла заряду q_0 в точці $x = x_0$:

$$\frac{Q_i}{q_0} = \frac{1}{L} \int_0^x \exp\left[-\frac{1}{\tau_i \mu_i} \int_0^{x'} \frac{dx''}{E_i(x'')}\right] dx', \quad (8)$$

де $x = x_0$ положення поверхні шару TI (відлік координати здійснюється зі сторони поверхні запису інформації).

Роздільна здатність R_i оптично-реєструючих непасивуючих ($i = 1$) або пасивуючих ($i = 2$) напівпровідникових наноструктур визначається формулою

$$R_i = \frac{\partial \left(\frac{Q_i}{q_0} \right) / \frac{\partial x}{b}}{\left|_{x=x_0} \right.}, \quad (9)$$

де $b = \frac{1}{I_0} \frac{\partial I}{\partial x}$ – відносний крайовий градієнт

інтенсивності падаючого світла.

З врахуванням співвідношень (8), (9) формула для роздільної здатності R_i набуде вигляду:

$$R_i = \frac{1}{Lb} \exp \left[- \frac{1}{\tau_i \mu_i} \int_0^{x'} \frac{dx''}{E_i(x'')} \right] \Bigg|_{x'=x_0} \quad (10).$$

ВИСНОВКИ

В результаті проведених досліджень:

1. Отримано, методом сублімації в атмосфері водню, напівпровідникові зразки CdTe ($\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$), що використовуються як робочі елементи для оптичних реєструючих середовищ на n - p - i - m наноструктурах.

2. Виведено вираз для роздільної здатності R_i оптично-реєструючих напівпровідникових наноструктур.

3. Запропоновано розширення спектрального діапазону запису оптичної інформації на основі використання твердого розчину $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($0 \leq x \leq 1$), як робочого напівпровідникового елемента в n - p - i - m наноструктурах.

4. Встановлено, що коли концентрація атомарного водню N_H не перевищує концентрацію акцепторів N_A ($N_H \leq N_A$) спостерігається підсилення ефекту

пасивації ЕАЦ, що приводить до збільшення роздільної здатності R_i оптичного запису зображень на наноструктурах виду n - p - i - m , а у випадку $N_H > N_A$ – до зменшення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Кашерининов П.Г. Быстрые оптические регистрирующие среды на полупроводниковых наноструктурах для записи и обработки изображений / П.Г. Кашерининов, А.А. Томасов // Физика и техника полупроводников. – 2008. – Т. 42, №11. – С. 1391-1399.
- [2] Британ В.Б. Вплив обробки монокристалів $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Te}$ у атмосфері водню на електрично-активні центри / В.Б. Британ, Р.М. Пелещак, Д.І. Цюцюра, Д.В. Корбутяк // Фізика і хімія твердого тіла. – 2009. – Т. 10, № 1. – С. 41-44.
- [3] Кривоглаз М.А. Дифракция рентгеновских лучей и нейтронов в неидеальных кристаллах / М.А. Кривоглаз – Киев: Наук. думка, 1983. – 408 с.
- [4] Кашерининов П.Г. Фотоэлектрические явления в структурах на высокоомных полупроводниковых кристаллах с тонким слоем диэлектрика на границе полупроводник-металл / П.Г. Кашерининов, А.В. Кичаев, А.А. // Физика и техника полупроводников. – 1995. – Т. 29, № 11. – С. 2092-2107.
- [5] Cavalleri G. Extension of Ramo's theorem as applied to induced charge in semiconductor detectors / G. Cavalleri, E. Gatti, G. Fabri, and V. Svelto, // Nucl. Instrum. Methods. – 1971, 92. – P 137–140.