

МАТЕРІАЛИ ДЛЯ СЕНСОРІВ

SENSOR MATERIALS

УДК 625.315.592

ДОСЛІДЖЕННЯ БАР'ЄРНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГЕТЕРОПЕРЕХОДУ CdS-Cu₂S З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДИКИ BELIV

В. А. Борщак

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова
вул. Дворянська, 2 Одеса 65082 Україна borschak_va@mail.ru
тел.: +380(48)-723-34-61

ДОСЛІДЖЕННЯ БАР'ЄРНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГЕТЕРОПЕРЕХОДУ CdS-Cu₂S З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДИКИ BELIV

В. А. Борщак

Анотація. У роботі проведено дослідження концентрації вільних носіїв, їх рухливості, висоти бар'єру в зразках полікристалічних гетероструктур Cu₂S-CdS з використанням методики вимірювань бар'єрних характеристик при підключенні лінійно зростаючої напруги. Виділено три типи зразків з характерним виглядом залежностей зростання струму від часу при такому зміщенні. Проведено моделювання отриманих експериментальних кривих таких залежностей. Визначено такі параметри досліджуваних гетероструктур, як концентрація вільних носіїв, рухливість, висота бар'єру. Показано, що час нанесення плівок і температура підкладки в значній мірі впливають на фотоелектричні властивості зразків за рахунок варіювання концентрації вільних носіїв і глибоких рекомбінаційних центрів, що є актуальним при оптимізації технологічних параметрів отримання сенсорів зображень на базі таких структур.

Ключові слова: методика BELIV, неідеальний гетероперехід, сенсор зображень

CdS-Cu₂S HETEROJUNCTION BARRIER PROPERTIES CHARACTERIZATION BY BELIV

Borschak V. A.

Abstract. The investigation of free carrier concentration, mobility, barrier height in polycrystalline Cu₂S-CdS heterostructures formed by substitution technique have been examined by the barrier evaluation by linearly increasing pulsed voltage technique. Measurements enabled us to reveal three types of samples with different dependences of current increment during bias pulse. Mathematical modeling of experimental curves was held then. Several internal parameters like free carriers concentration, mobility, barrier height were obtained. It is shown that the layer deposition temperature and duration affect to photoelectrical properties of heterojunction layers by varying free carrier density and the density of deep recombination centers. That is actual in technical parameters optimization during the fabrication of image sensors based on studied structure.

Keywords: BELIV methodic, nonideal heterojunction, image sensor

ИССЛЕДОВАНИЕ БАРЬЕРНЫХ СВОЙСТВ ГЕТЕРОПЕРЕХОДА $\text{Cu}_2\text{S}-\text{CdS}$ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДИКИ BELIV

В. А. Борщак

Аннотация. В работе были проведены исследования концентрации свободных носителей, их подвижности, высоты барьера в образцах поликристаллических гетероструктур $\text{Cu}_2\text{S}-\text{CdS}$ с использованием методики измерений барьерных характеристик при подключении линейно возрастающего напряжения. Выделены три типа образцов с характерным видом зависимостей нарастания тока от времени при таком смещении. Проведено моделирование полученных экспериментальных кривых таких зависимостей. Определены такие параметры исследуемых гетероструктур, как концентрация свободных носителей, подвижность, высота барьера. Показано, что время нанесения пленок и температура подложки в значительной степени влияют на фотоэлектрические свойства образцов за счёт варьирования концентрации свободных носителей и глубоких рекомбинационных центров, что является актуальным при оптимизации технологических параметров получения сенсоров изображений на базе таких структур.

Ключевые слова: методика BELIV, неидеальный гетеропереход, сенсор изображений

Вступ

Напівпровідникові гетероструктури можуть служити в якості основного матеріалу фотоприймачів, для використання в оптичних комунікаційних приладах, особливо в ІЧ-області спектра [1]. Дослідження гетероструктур показали широкі можливості для підвищення продуктивності існуючих ІЧ-детекторів за рахунок низької розсіювальної потужності, низького рівня шуму, швидкого часу відгуку і високою квантовою ефективністю в порівнянні з гомоструктурами [2]. Зокрема, в оптосенсориці може бути застосована неідеальність гетероструктури [3]. Наприклад, у зв'язку з невідповідністю параметрів кристалічної решітки сполук в бар'єрній області переходу $\text{CdS}-\text{Cu}_2\text{S}$ спостерігається велика щільність центрів-пасток і центрів рекомбінації. Ці дефекти невідповідності спричиняють ефект фото-індукованої модуляції форми потенційного бар'єру переходу. Цей ефект може бути використаний в роботі сенсора зображення [4]. Висока просторова розподільна здатність, можливість збереження сигналу протягом тривалого часу і використання великих робочих поверхонь є основними перевагами розробленого сенсора. Крім того, відмічені деякі перспективи застосування зазначених неідеальних гетероструктур в пристроях фіксації рентгенівських зображень [5].

Методи вимірювання

У представлених нижче дослідженнях електричних характеристик гетероструктури використовувалася методика BELIV (Barrier evaluation by linearly increasing voltage). Головною метою при цьому було вивчення динамічних характеристик бар'єру та процесів генераційного струмопереносу у досліджуваній структурі. Система складалася з генератора трикутного імпульсу заданої амплітуди і частоти та послідовно з'єднаних зразку та зовнішнього резистору. На цьому резисторі ($R = 50$ Ом) вимірювалося значення струму, що проходить по ланцюгу, результат фіксувався за допомогою цифрового осцилографа Agilent Technologies DSO6102A. При цьому з генератора подавався трикутний пилоподібний імпульс лінійно зростаючого напруження у запертому напрямку з піковим значенням амплітуди 0.5 – 2.5 В та тривалістю 30 – 1000 мкс.

BELIV методика базується на аналізі зміни бар'єрної ємності (C_b) під дією лінійно зростаючого імпульсу напруги $U(t)=At$. Залежність $C_b(t)$ від значення $U(t)$ для діодного p-n переходу визначається простим рівнянням

$$C_b = C_{b0} \left(1 + \frac{U}{U_{bi}} \right)^{-1/2}, \quad (1)$$

де початкове значення ємності незміщеного переходу в зразку площею S :

$$C_{b0} = \frac{\epsilon_0 S}{W_0} = \left(\frac{\epsilon_0 S^2 e N_D}{2U_{bi}} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

а ϵ_0 - діелектрична стала, e - діелектрична проникність матеріалу, e - елементарний заряд, U_{bi} - висота потенційного бар'єру переходу, $W_0 = (2ee_0 U_{bi} / e N_D)^{1/2}$ - ширина області просторового заряду незміщеного переходу, $A = U_p / t_{PL}$ - параметр трикутного імпульсу амплітудою U_p та тривалістю t_{PL} .

Часова залежність накопичення заряду на бар'єрній ємності $q = C_b U$ зумовлює протікання струму $i_c(t)$ по зовнішньому ланцюгу. Цей струм при невеликих значеннях U_p складається з початкового значення (при $t=0$) AC_{b0} зумовленого струмом зміщення та спадаючою компонентою за рахунок вилучення заряду. Для діелектричного матеріалу струм буде цілком визначатися значенням початкової компоненти. Спадна компонента струму в свою чергу впливає на значення висоти бар'єру U_{bi} . Наявність генераційних центрів може виявлятися у BELIV залежностях як у зміні ширини ОПЗ протягом імпульсу (за рахунок зміни розподілу прикладеного електричного поля), так і за рахунок накопичення заряду в бар'єрній області, коли збільшення ширини ОПЗ виставляє на перший план вплив генераційного струму. В цьому режимі генераційний струм i_g зумовлений збільшенням об'єму базового шару при подачі імпульсу напруги, з якого збираються носії заряду визначається виразом:

$$i_g(t) = \frac{en_i S W_0}{\tau_g} \left(1 + \frac{U_c(t)}{U_{bi}} \right)^{1/2}. \quad (3)$$

Значення i_g зростає з прикладеною напругою $U_c(t)$ та може перевищити рівень струму зарядки бар'єру на пізнішій стадії відгуку на трикутний імпульс напруги. Спадаюча компонента видалення заряду та зростаюча складова, пов'язані з генераційним струмом, обумовлюють наявність екстремуму-мінімуму на часовій залежності струму, що протікає через ланцюг.

Ступінь прояву генераційної компоненти

струму може бути контрольована при спостереженні зміни форми BELIV залежності при варіюванні тривалості прикладеного імпульсу напруги. Для дослідження характеристик щодо захвату носіїв була використана методика освітлення зразків, що дозволяло змінювати концентрацію вільних носіїв та ступінь заповнення пасток. Для цього при виконанні BELIV вимірювань використовувалося стаціонарне безперервне джерело світла широкого спектрального діапазону з можливістю варіювання інтенсивності фотозбудження.

Експериментальні результати

При дослідженні вибірки зразків в темнових умовах та при наявності джерела фотозбудження чітко виділилися три типи характерних BELIV залежностей, які можливо асоціювати з властивостями досліджуваної гетероструктури. Перший тип характеризується ступінчатою формою залежності струму від часу - початкове зростання досить різко переходить у майже постійне значення струму (Рис.1, а). Результати спостереження цього типу залежності показують наявність високої діелектричної сталої базового шару та малої концентрації вільних носіїв у відповідних зразках. У зразках 2 типу спостерігається насичення струму зарядки бар'єрної ємності та наступне зростання за рахунок вилучення накопленого заряду в ОПЗ (Рис. 2, б). Форма залежності 3 типу представлена на Рис. 1, в. У цьому випадку характерною рисою є чіткий прояв генераційної компоненти струму у пізнішій стадії розвитку сигналу-відповіді за рахунок емісії носіїв з рівнів-пасток.

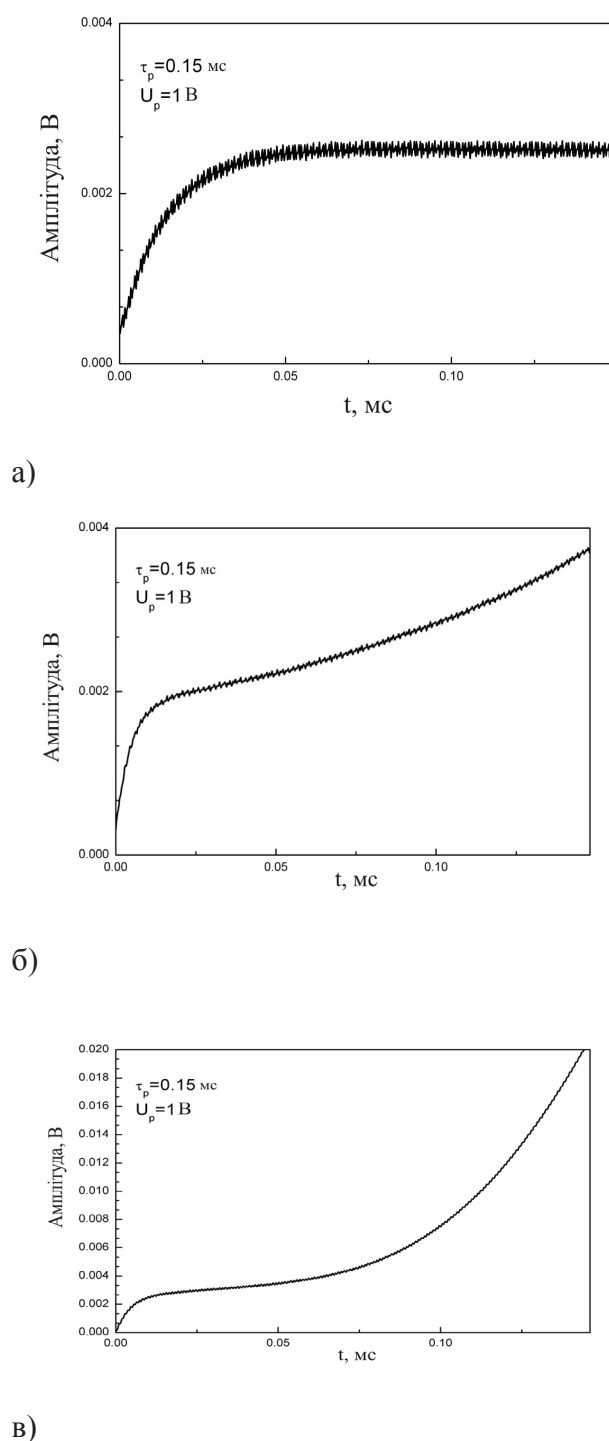


Рис. 1. Типові темнові BELIV залежності зразків $\text{Cu}_2\text{S-CdS}$: а – 1 тип, б – 2 тип, в – 3 тип

Відмінності, що постерігаються у формі BELIV характеристик можуть бути пояснені врахуванням варіації відносної густини домішок (що формують мілкі рівні) та концентрації центрів захоплення (що

асоціюються з глибокими рівнями). У зразках 1-го типу густина мілких рівнів мала, у той час як велика концентрація пасток є достатньою для захоплення майже всіх вільних носіїв, що призводить до збіднення носіями базового матеріалу CdS. Це обумовлює конденсаторну характеристику зразків 1-го типу при подачі трикутного імпульсу напруги зворотного напрямку. Другий тип зразків демонструє превалювання струмів зарядки бар'єру та екстракції заряду, що є ознакою значно більшої концентрації мілких донорних центрів у порівнянні з концентрацією пасток. У зразках 3-го типу концентрація мілких донорних центрів достатньо висока, щоб запобігти стану повного збіднення базового шару при його товщині 20-25 мкм. Однак, і значення концентрації зарядових пасток теж велике, і це спричиняє домінування генераційної компоненти струму у пізнішій стадії залежності. Тривалість вхідного імпульсу напруги, при якій проявляються вказані особливості BELIV залежностей, визначає порядок величини часу діелектричної релаксації t_M . Зазначений параметр безпосередньо визначається концентрацією рівноважних вільних носіїв (і відповідно мілких донорних центрів) n_0 :

$$\tau_M = \frac{\varepsilon_0}{en_0\mu} \quad (4)$$

Знаючи значення рухливості основних носіїв m , та діелектричної проникності ε для CdS, вдалося визначити значення $n_0 = 1.5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Далі, враховуючи вимірне значення максимуму струму $i_C(0) = AC_{b0}$ зарядки бар'єрної ємності та вираз (2) для ємності бар'єру, було розраховано висоту бар'єру переходу $U_{bi} = 0.7 \text{ eV}$.

Моделювання отриманих BELIV залежностей

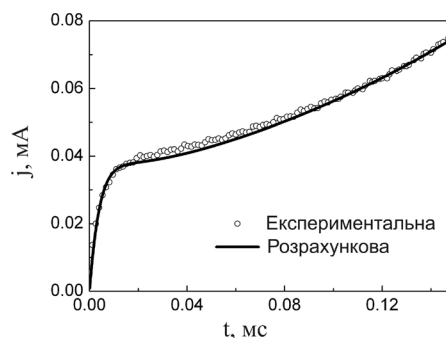
В процесі вимірювань отримано серії BELIV залежностей для різних значень амплітуди прикладеного імпульсу. Водночас, проводилися чисельні розрахунки та комп'ютерне моделювання цих експериментальних кривих. Після проведення процедури зближення фак-

тичних та розрахункових залежностей методом підбору внутрішніх параметрів (Рис. 2, а, б) для зразків 2-го типу були отримані наступні величини $n_0 = 1.5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $U_{bi} = 0.7 \text{ В}$, $m = 0.9 \text{ см}^2/\text{В}$. Для 3-го типу, де чітко спостерігається генераційна компонента струму, з моделювання (Рис. 2, в, г) та розрахунків отримано значення $n_0 = 1.5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $U_{bi} = 0.7 \text{ В}$ and $t_g = 6.5 \text{ мкс}$. Для зразків 1-го типу можливим було лише отримання значення геометричної ємності переходу $C_g = 3 \text{ нФ}$, і це значення узгоджується з незалежно вимірними товщиною d та площею S шару CdS, що визначають ємність досліджуваної структури.

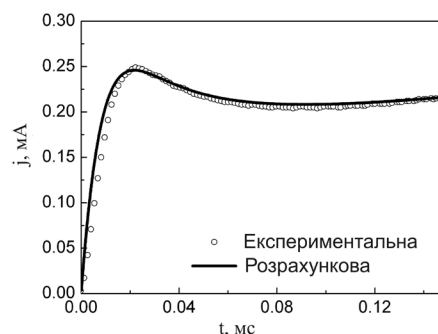
Для перевірки розрахованих характеристик та для уможливлення маніпуляції процесами заповнення-спустошення центрів-пасток було проведено серію вимірювань BELIV залежностей при наявності сталого фотозбуждення зразків світлом широкого спектрального діапазону. Експериментальні та промодельовані BELIV криві при освітленні гетеропереходу також представлені на рис. 2 (б, г). Видно, що розрахункові залежності добре відтворюють результати, які отримані з експериментальних вимірювань.

Вказані відмінності у концентрації мілких донорів та пасток, які призводять до спостережених значних варіацій електричних властивостей гетеропереходів, можуть бути віднесені на рахунок технологічних режимів, використаних при формуванні зразків, зокрема товщини та хімічного складу шарів гетероструктури.

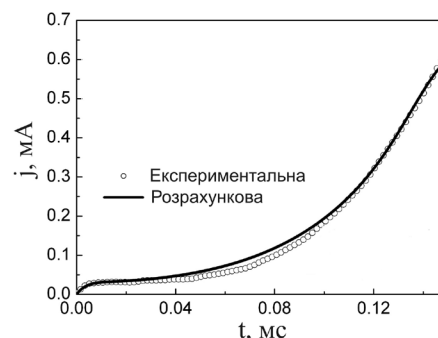
Головними параметрами, що варіювалися при отриманні зразків, були температура підкладки та час нанесення плівок (що визначав товщину базового шару CdS та шару Cu_2S). Товщина базової області характеризує резистивні властивості структури та розміри сформованих мікрокристалів. Так, зразки з більш товстим шаром CdS демонстрували переважно 1 тип розглянутих вище залежностей. Також виявлена кореляція зі значенням товщини плівки Cu_2S – чим довший час нанесення плівки CuCl , тим більше характеристики зразка наближуються до 3 типу.



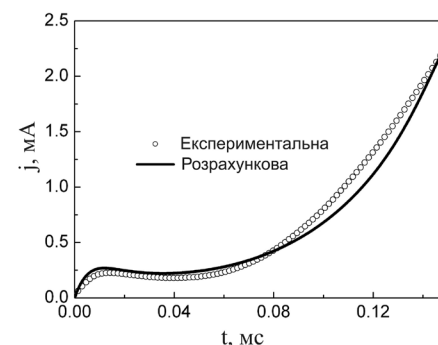
а



б



в



г

Рис. 2. Зіставлення експериментальних (кола) та розрахованих (суцільні лінії) BELIV кривих для зразків 2-го (а, б) та 3-го (в, г) типів у темряві (а, в) та при освітленні білим світлом (б, г)

Література

- [1] W. D. Hu, X. S. Chen, F. Yin, Z. H. Ye, C. Lin, X. N. Hu, Z. J. Quan, Z. F. Li, W. Lu, *Opt. Quantum Electron.* 40, 1255 (2009).
- [2] A. D. D. Dwivedi, *J. Appl. Phys.* 110, 043101 (2011)
- [3] D. L. Vassilevski, *Sensors and Actuators*, A55 (1996), 167 – 172
- [4] V. A. Borschak, V. A. Smyntyna, Ie. V. Brytavskiy, A. A. Karpenko, and N. P. Zatovskaya, *Semiconductors*, , Vol. 47, No. 6 (2013), 838–843.
- [5] V. A. Smyntyna, V. A. Borschak, M. I. Kutalova, N. P. Zatovskaya, A. P. Balaban, *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. (2004) V. 7, N 2. P. 222-223.