

## ВПЛИВ ТИСКУ НА ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ГРАНИЦІ РОЗДІЛУ ГЕТЕРОКОНТАКТІВ НА ОСНОВІ ШАРУВАТИХ КРИСТАЛІВ

М.О. Воробець

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

Україна

Надійшла до редакції 08.08.2008

Вивчено вплив одноосного тиску від 0 до 100 кПа при постійній температурі 300 К в напрямку перпендикулярному до площини локалізації границі розділу гетеропереходів  $n$ -InSe- $p$ -GaSe на зміну електричних та фотоелектричних параметрів. Знайдено, що густина струму через гетерограницю зростає при збільшенні тиску внаслідок збільшення площі прямого контакту між поверхнями шаруватих кристалів GaSe та InSe. Зміни електричних та фотоелектричних параметрів гетероконтактів InSe/GaSe обговорюються з точки зору модифікації проміжного шару. Результати проведених досліджень свідчать про можливість керованої зміни параметрів гетеропереходів та варіювати використання їх у пристроях оптоелектроніки.

### ВСТУП

У роботі [1] представлені результати дослідження фізичних властивостей границі розділу радіаційно-стійких гетеропереходів на базі анізотропних кристалів GaSe та InSe, виготовлених приведенням поверхонь двох напівпровідників у прямий оптичний контакт. Зазначено, що гетероконтакт GaSe/InSe є структурою напівпровідник-діелектрик-напівпровідник, в якій шар атомів кисню, адсорбованих з атмосфери, діє як діелектричний прошарок. Цей прошарок є нерівноважним станом з дуже довгим часом релаксації.

У даній роботі представлені дослідження впливу статичного тиску від 0 до 100 кПа, перпендикулярно до площини бар'єра, на електричні та фотоелектричні параметри гетеропереходу  $n$ -InSe- $p$ -GaSe. Зміни електричних та фотоелектричних параметрів гетероконтакту InSe/GaSe обговорюються з точки зору модифікації границі розділу.

### МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

Для проведення експерименту були вирощені методом Бріджмена кристали GaSe та InSe. Рухливості та концентрації вільних носіїв заряду, що визначались з холівських вимірювань зразків  $p$ -GaSe та  $n$ -InSe, становили:  $\mu_p = 10 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ ,  $\mu_n = 800 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ ,  $p = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ,  $n = 10^{15} \text{ см}^{-3}$  при температурі  $T = 300 \text{ К}$ .

Гетеропереходи були отримані за методикою, запропонованою в роботі [2]. Зі злитків  $p$ -GaSe та  $n$ -InSe шляхом сколювання були

виготовлені пластинки прямокутної форми з однаковими лінійними розмірами поверхні  $5 \times 5 \text{ мм}^2$ . Пластинки не потребували додаткової обробки, накладалися одна на одну та приводилися в оптичний контакт. Омічні контакти створювались у спосіб наплавлення індію на зовнішні поверхні. Виготовлені таким способом гетеропереходи поміщалися в установку для створення одновісного навантаження.

### РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

На рис. 1 представлені залежності ВАХ при дії одновісного тиску в напрямку локалізації границі розділу при постійній температурі  $T = 300 \text{ К}$ . Прямий струм гетеропереходу  $p$ -GaSe- $n$ -InSe при невеликому зміщенні у відсутності впливу зовнішнього механічного навантаження визначається тунельно-рекомбінаційними процесами та може бути описаний виразом [3]:

$$I = I_r + I_t = I_{or} \left[ \exp\left(\frac{eU}{2kT}\right) - 1 \right] + I_t, \quad (1)$$

де  $I_{or}$  – рекомбінаційний струм відсічки.

При дії тиску в умовах низького прямого зміщення у випрямляючій структурі з гетеропереходом GaSe-InSe домінує одне джерело струму, а саме рекомбінація просторового заряду в  $p$ - $n$ -переході. Діодний коефіцієнт має значення 1,8 при кімнатній температурі, тоді як для структур при дії тиску він дорівнює 2.

Формула (1) виконується в умовах при низьких значеннях зміщення, коли послідовним опором структури можна знехтувати.

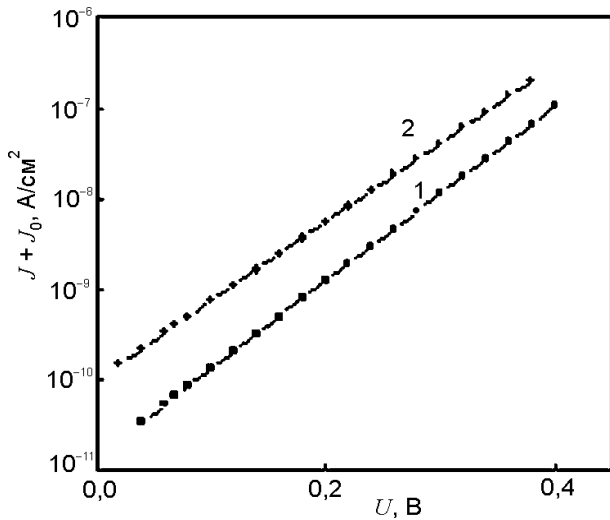


Рис. 1. Темнова вольт-амперна характеристика (пряме зміщення) напівпровідникового гетеропереходу  $p$ -GaSe- $n$ -InSe при температурі  $T = 300$  К: 1 – без механічного навантаження; 2 – при дії тиску  $P = 40$  кПа.

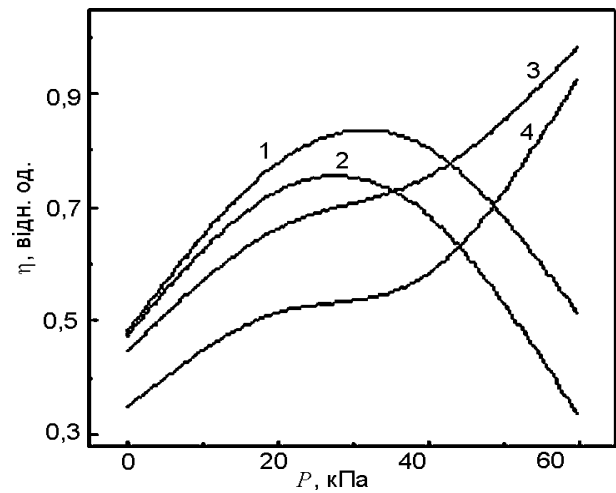


Рис. 2. Залежність відносної квантової ефективності фотоелектроперетворення гетеропереходу  $n$ -InSe- $p$ -GaSe від тиску при кількох енергіях фотонів, еВ: 1 – 2,13; 2 – 2,08; 3 – 1,75; 4 – 1,35.  $T = 300$  К.

На рис. 2 представлені залежності відносної квантової ефективності гетеропереходу  $n$ -InSe- $p$ -GaSe від тиску при фіксованих значеннях енергії квантів світла. Результати проведених досліджень зводяться до кількох положень. По-перше, в області енергії фотонів  $hS$ , більших ширини забороненої зони селеніду галію (для GaSe  $E_g = 2,0$  еВ при температурі  $T = 300$  К), залежності квантової ефективності подібні. Зі зростанням тиску відносна квантова ефективність спочатку зростає, а починаючи зі значень тиску приблизно 30 кПа зменшується, що вочевидь пов'язано з розсіюванням носіїв заряду внаслідок збільшення кількості дефектів в об'ємі кристала. Оскільки в спектрі оптичного пропускання GaSe та InSe не спостерігається якісних змін, то особливості залежності квантової ефективності від тиску пов'язані не з оптичними властивостями шаруватих кристалів, а з появою структурних дефектів та станом гетерограниці.

Аналіз та інтерпретацію експериментальних даних зручно проводити, використовуючи енергетичну зонну діаграму. Перенесення носіїв заряду в гетеропереході в основному визначається явищами на чи поблизу метастабільної поверхні розділу. Окрім того, картину ускладнюють розриви зони провідності та валентної зони, які виникають через наявність дипольних шарів на поверхні поділу.

На рис. 3а схематично показано механізм переносу носіїв заряду через гетероперехід. Дірки з GaSe тунелюють у стани, локалізовані в площині гетеропереходу, а потім рекомбінують з електронами з InSe.

Межа розділу гетеропереходу представляє собою чергування ділянок реального “щільного” контакту GaSe/InSe ( $p$ - $n$ -перехід) та ділянок діелектричного прошарку (рис. 4).

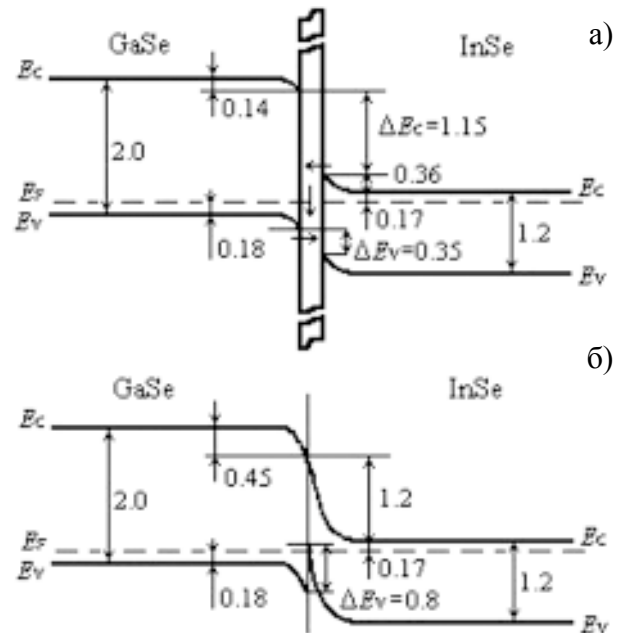


Рис. 3. Енергетична зонна діаграма  $p$ - $n$ -гетеропереходу InSe-GaSe в умовах термодинамічної рівноваги: а) – з врахуванням станів, локалізованих у площині гетеропереходу; б) – у випадку відсутності станів.  $E_C$ ,  $E_V$  – зона провідності та валентна зона,  $\Delta E_C$ ,  $\Delta E_V$  – відповідні розриви зон на гетерограниці,  $E_F$  – рівень Фермі. Енергії вказані в електронвольтах.

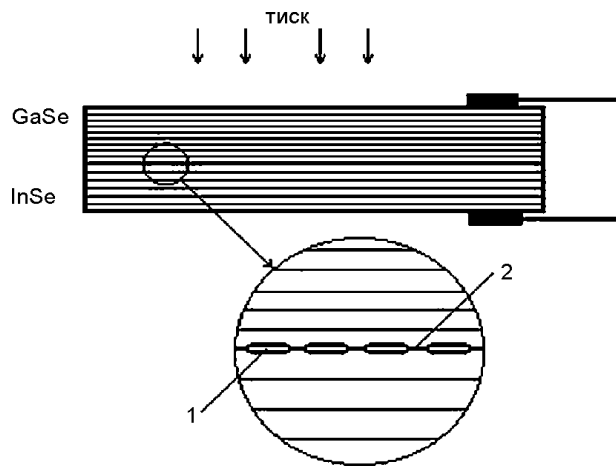


Рис. 4. Структура InSe-GaSe з прямим оптичним контактом: 1 – діелектричний прошарок; 2 – ділянка щільного контакту.

У випадку зменшення станів на границі розділу тунельна складова струму скорочується, при цьому відбувається збільшення енергетичного бар'єра для дірок у валентній зоні (рис. 3б).

У разі існування діелектричного прошарку на межі розділу матеріалів GaSe та InSe, контактна різниця потенціалів визначається величиною вигину енергетичних зон.

Згідно [4], величина контактної різниці потенціалів визначається виразом:

$$e\phi_0 = (\chi_p + E_{gp} - E_{Fp}) - (\chi_n + E_{Fn}), \quad (2)$$

де  $\chi_p$  та  $\chi_n$  – величини спорідненості до електрона для напівпровідників *p*- та *n*-типу провідності відповідно;  $E_{gp}$  – ширина забороненої зони напівпровідника *p*-типу провідності;  $E_{Fp}$  – енергетична відстань від стелі валентної зони  $E_v$  до рівня Фермі  $E_F$  у напівпровіднику *p*-типу провідності,  $E_{Fn}$  – від рівня Фермі до дна зони провідності  $E_c$  у напівпровіднику *n*-типу провідності. Положення рівня Фермі для *p*-GaSe визначалось у відповідності з відомою формулою [4]:

$$E_{Fp} = kT \ln(N_v/p), \quad (3)$$

$N_v$  – ефективна густина станів у валентній зоні, й складало 0,18 еВ. Аналогічно визначалося положення рівня Фермі в *n*-InSe. Значення рівня Фермі в *n*-InSe  $E_{Fn}$  складало 0,17 еВ при температурі  $T = 300$  К.

При розрахунку за формулою (2) значення електронної спорідненості приймалося рівним  $\chi_n = \chi_p = 3,6$  еВ. Згідно (2), величина контактної різниці потенціалів для ідеального випадку повинна складати 1,65 еВ.

Очевидно, що одновісний тиск впливає на якість гетеропереходу. При цьому відбувається наближення поверхонь шаруватих кристалів GaSe та InSe до величини, що суттєво не перевищує постійні кристалічної ґратки матеріалів. Скорочується кількість поверхневих станів, фізичні властивості яких відрізняються від об'ємних.

Зменшення густини заряджених станів на границі розділу призводить до збільшення ширини області просторового заряду та збільшення величини контактної різниці потенціалів.

При дії тиску розрив у зоні провідності зменшується, наближаючись в ідеальному випадку до нуля. Внаслідок цього збільшується вигин енергетичних зон, а при електричних вимірюваннях спостерігається зростання контактної різниці потенціалів.

## ВИСНОВКИ

Одержані результати підтверджують припущення про те, що під дією тиску на гетерокontakt на основі шаруватих кристалів між компонентами, внаслідок виштовхування кисневого прошарку, формується реальний щільний контакт. Це засвідчує факт зростання густини струму через гетероперехід. Оскільки вимірювання відбувалися при постійному значенні температури, можна припустити, що зростання густини струму в прямому та зворотному напрямках відбувається за рахунок суттєвого збільшення площі гетеропереходу з щільним гетероконтактом із одночасним зменшенням площі діелектричного прошарку у вигляді ультратонкого шару кисню. Результати проведених досліджень свідчать про можливість керованої зміни параметрів гетеропереходів та варіювати використання їх у пристроях оптоелектроніки.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Драпак С.І., Ковалюк З.Д. Самоорганізація границі розділу гетеропереходів *p*-GaSe–*n*-InSe, виготовлених методом посадки на оптичний контакт, в процесі довготривалого зберігання// Фізика і хімія твердого тіла. – 2005. – Т. 6, № 2. – С. 230-234.
2. Бакуменко В.Л., Ковалюк З.Д., Курбатов Л.Н., Тагаєв В.Г., Чишко В.Ф. Исследо-

- вание гетеропереходов InSe–GaSe, приготовленных посадкой на оптический контакт. I. Электрические характеристики неосвещенных переходов//ФТП. – 1980. – Т. 14, № 6. – С. 1115-1119.
3. Kovalyuk Z.D., Makhniy P.V., Yanchuk O.I. Mechanisms of forward current transport in *p*-GaSe–*n*-InSe heterojunctions//Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics. – 2003. – Vol. 6, № 4. – P. 458-460.
4. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. – М.: Наука, 1977.

**ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА  
ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА  
ГЕТЕРОКОНТАКТОВ НА ОСНОВЕ  
СЛОИСТЫХ КРИСТАЛЛОВ**

**М.О. Воробец**

Исучено влияние одноосного давления от 0 до 100 кПа при постоянной температуре 300 К в направлении перпендикулярном к плоскости локализации границы раздела гетеропереходов *n*-InSe–*p*-GaSe на изменение электрических и фотоэлектрических параметров. Найдено, что плотность тока через гетерограницу увеличивается вследствие увеличения площади прямого контакта между поверхностями слоистых кристаллов GaSe и InSe. Изменение электрических и фотоэлектрических параметров гетероконтакта InSe/GaSe обсуждаются с точки зрения модификации границы раздела. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о возможности управляемого изменения параметров гетеропереходов и варьировать использование их в приборах оптоэлектроники

**EFFECT OF PRESSURE ON THE  
ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF  
THE INTERFACE LAYER OF  
HETEROCONTACTS BASED  
ON LAYERED CRYSTALS**

**M.O. Vorobets**

The effect of uniaxial pressure from 0 to 100 kPa at a constant temperature 300 K in the direction perpendicular to the localization plane of the interface for *n*-InSe–*p*-GaSe heterojunction on a variation on the electrical and fotoelectrical parameters is studied. It has been found that the density of a current through heteroboundary increases by increase of a pressure due to increase of the area of direct contact between surfaces of layered GaSe and InSe crystals. The changes of the electrical and fotoelectrical parameters of the InSe/GaSe heterojunction are discussed from the point of view modification of the interface layer. These results indicate that it is possible to direct change the parameters of heterojunctions and to vary the uses in the devices of optoelectronics.