

Чернівецьке відділення Інституту проблем матеріалознавства НАНУ, Чернівці
*Чернівецький національний університет ім. Ю.Федьковича, Чернівці

ЕЛЕКТРИЧНІ І ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ *p-n*-ПЕРЕХОДІВ У МОНОСЕЛЕНІДІ ІНДІЮ

Досліджено основні електричні і фотоелектричні властивості *p-n*-переходів на базі InSe, виготовлених методом посадки на оптичний контакт. Експериментальні характеристики адекватно пояснюються в рамках теорії генераційно-рекомбінаційних, тунельних і лавинних механізмів формування струму в діодних структурах.

The basic electrical and photoelectric properties *p-n*-transitions on the basis InSe are investigated, made by a method of optical contact. An experimental performance adequately speak within the framework of the theory of generation-recombination, tunnel and avalanche mechanisms of formation of a current in diode frames.

Найбільш розповсюджений метод створення випрямляючих структур на основі шаруватих напівпровідників – посадка на оптичний контакт [1]. Його уже давно і успішно використовують для виготовлення різноманітних гетеропереходів, у тому числі й таких, компонентом яких є моноселенід індію [2,3]. Незважаючи на біполярну провідність InSe та очевидну простоту створення *p-n*-переходу в ньому, дослідженню таких структур присвячена надзвичайно мала кількість публікацій [4-6]. Тому мета даної роботи – вивчення основних електричних і фотоелектричних характеристик діодів із *p-n*-переходом на базі моноселеніду індію.

Монокристали InSe були вирощені методом Бріджмена, і для досягнення діркової провідності легувались кадмієм. *p-n*-перехід створювався методом посадки на оптичний контакт тонкої пластинки *n*-InSe на більш товстий підкладник *p*-InSe. Вимірювання темнових і світлових характеристик здійснювалось у режимі постійного струму, а освітлення – з боку *n*-InSe. Дослідження проведено в області кімнатних температур.

Прямий темновий струм $I_{пр}$ діодів при низьких напругах V (рис. 1) описується відомим виразом, який отримується при переважаючій рекомбінації носіїв в області просторового заряду (ОПЗ) [7]:

$$I_{пр} \cong I_{gr}^0 \exp(eV/2kT), \quad (1)$$

де I_{gr}^0 – струм відсічки при $V=0$. Відхилення реальної вольт-амперної характеристики (ВАХ) від

залежності (1) зумовлено впливом послідовного опору $R_{п}$ діода. Останній легко знайти з ВАХ при великих зміщеннях, коли спостерігається лінійна залежність між $I_{пр}$ і V (врізка на рис. 1). Дослідна величина $R_{п}$ виявляється досить великою і змінюється для різних зразків у межах $(2 \div 5) \cdot 10^3$ Ом. У результаті, частина зовнішньої прикладеної напруги падає на $R_{п}$, а не на самому бар'єрі, як того вимагає теорія при одержанні виразу (1). Зрозуміло, що це приводить до розбіжності експериментальної і теоретичної ВАХ, яка зростає в міру збільшення прямого струму. Зауважимо, що для ефективного протікання генераційно-рекомбінаційних процесів в ОПЗ необхідно, щоб висота потенціального бар'єра ϕ_0 структури була більшою від половини ширини забороненої зони $E_g/2$ напівпровідника [7]. Ця умова в нашому випадку

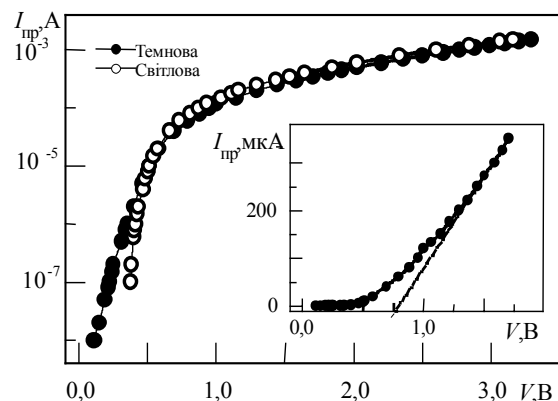


Рис.1. ВАХ *p-n*-переходу при 300 К. На врізці – темнова ВАХ при великих прямих струмах.

апріорі виконується, оскільки для досліджуваних *p-n*-переходів при 300 К $E_g \approx 1,2$ еВ, а $\phi_0 \approx 0,8$ еВ (врізка на рис.1).

Збільшення прямої напруги має приводити до зміни механізму проходження струму, а саме – з рекомбінації в ОПЗ на надбар'єрне проходження носіїв заряду [7]. При цьому повинна спостерігатись залежність типу

$$I_d \approx I_s \exp(eV/kT), \quad (2)$$

де I_s – так званий, струм насичення. Як показують дослідження, темнові ВАХ не описуються виразом (2) внаслідок впливу послідовного опору, роль якого розглядалась вище. Разом з тим, формула (2) добре описує початкові ділянки світлових ВАХ. Це вказує на домінуючу роль генерації фотоносіїв у *n*-області, які дифузійним шляхом досягають ОПЗ і розділяються електричним полем бар'єра. Відхилення світлових ВАХ від залежності (2) при великих V , як і в попередніх випадках, зумовлено $R_{\text{п}}$. Величина останнього для освітленого *p-n*-переходу значно менша, ніж для неосвітленого, що свідчить про помітну фотопровідність квазінейтральних областей діода.

Обернений струм досліджуваних *p-n*-переходів у широкому діапазоні зміни V має тунельну природу. У цьому можна пересвідчитись, зіставивши дослідну залежність $I_{\text{об}}(V)$, з виразом, який для різкого бар'єра повинен мати вигляд [7]:

$$I_{\text{об}} \approx a_1 \exp(-b_1/\sqrt{\phi_0 - eV}). \quad (3)$$

Параметр a_1 визначає ступінь заповнення рівнів, з яких відбуваються тунельні переходи, а b_1 – швидкість зміни оберненого струму з напругою. Як видно з рис.2, залежність $I_{\text{об}}(V)$ непогано описується виразом (3), а відхилення від нього при низьких V зумовлено внеском у загальний струм генераційної складової [7]. Відсутність більш різкого росту $I_{\text{об}}$ в області великих V порівняно з тунельним струмом свідчить про відсутність процесів помноження, темнових носіїв заряду при даних умовах досліду. Разом з тим, останні досить чітко виявляються при дослідженні залежностей фотоструму I_p від оберненої напруги. Як видно з рис.2 (врізка), при $V \geq 2$ В спостерігається різке збільшення I_p , що можна пов'язати саме з процесами ударної іонізації. Справа в тому, що фотоносії, народжуючись у квазінейтральній *n*-області діода, проходять всю бар'єрну область. Водночас, темнові носії заряду більшу частину

ОПЗ долають тунельним шляхом без зміни своєї енергії. У результаті, на відміну від фотоносіїв, вони не можуть набрати порогової енергії, яка необхідна для ударної іонізації. Зазначимо, що характер залежності $I_p(V)$ свідчить про наявність лавинного помноження, не даючи водночас відповіді на те, який тип носіїв визначає ці процеси. Для вирішення цього питання необхідні окремі дослідження, які виходять за рамки даної роботи.

На завершення проаналізуємо характер залежностей струму короткого замикання I_{sc} і напруги холостого ходу V_{oc} від рівня освітленості L (рис.3). Аномальний хід $V_{\text{oc}}(L)$ при низьких L зумовлений причинами, які детально розглянуті в роботі [7]. Основною з них є великий послідовний опір діодної структури, який може модулюватись освітленням. Лінійна залежність $I_{\text{sc}}(L)$ типова для більшості діодних структур і характерна для біполярної генерації нерівноважних носіїв заряду при помірних рівнях збудження.

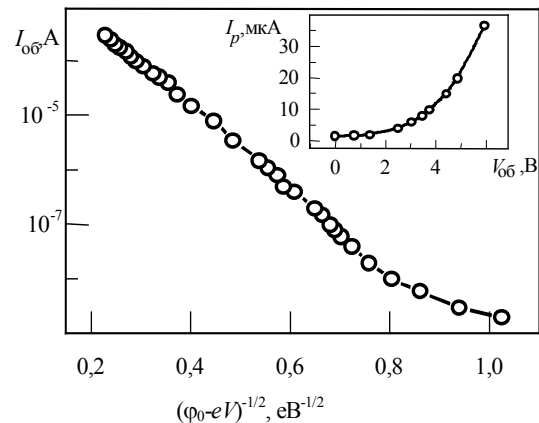


Рис.2. Співвідношення оберненої ВАХ з виразом (3). На врізці – залежність фотоструму від оберненої напруги при $T=300$ К.

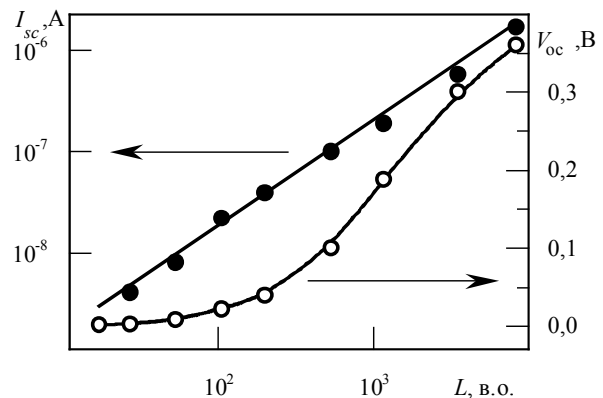


Рис.3. Залежність струму короткого замикання і напруги холостого ходу від рівня освітленості при 300 К.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бакуменко В.Л., Ковалюк З.Д., Курбатов Л.Н. и др. Исследование гетеропереходов InSe-GaSe, приготовленных посадкой на оптический контакт // Физика и техника полупроводников. - 1980. - **14**, вып.6. - С.1115-1119.
2. Катеринчук В.Н., Ковалюк М.З. P-n-гомогенные InSe-фотодиоды // Физика и техника полупроводников. - 1991. - **25**, вып.5. - С.954-957.
3. Kovalyuk Z.D., Katerinchuk V.N., Betsa T.V. Photoreponse spectral investigations for anisotropic semiconductor InSe // Optical Materials. - 2001. - **17**. - P.279-281.
4. Катеринчук В.Н., Ковалюк М.З. Гетеропереходы из InSe, сформированные термическим окислением кристаллической подложки // Письма в ЖТФ. - 1992. - **18**, №12. - С.70-72.
5. Katerinchuk V.N., Kovaluk M.Z. InSe-p-n homojunction diodes // Phys.Stat.Sol. (a). - 1992. - **133**. - P.45-48.
6. Катеринчук В.Н., Ковалюк М.З., Огородник А.Д. Гетероструктуры на основе селенидов индия // Неорганические материалы. - 1996. - **32**, №8. - С.937-940.
7. Махній В.П. Физические процессы в диодных структурах на основе широкозонных полупроводников A²B⁶: Дис.... докт. физ.-мат. наук. - Черновцы. - 1992.