

## ВПЛИВ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СЕЛЕНІДА ІНДІЯ ТА РЕЖИМІВ ФОРМУВАННЯ ВЛАСНОГО ОКСИДУ НА ВЛАСТИВОСТІ ГЕТЕРОПЕРЕХОДІВ ОКСИД-*p*-InSe

Методом нестехіометричного росту сполуки InSe та легуванням її цинком або кадмієм отримані досконалі кристали *p*-типу провідності. Формування гетеропереходів оксид-*p*-InSe шляхом термічного окислення кристалічної підкладки здійснено при різних температурно-часових режимах. Вимірюваннями вольт-амперних характеристик гетеропереходів підтверджена їх висока якість та встановлені оптимальні технологічні умови виготовлення.

The *p*-type perfect crystals by method non-stoichiometric growth InSe compound and doping it with Zn or Cd has been obtained. Forming the oxide-*p*-InSe heterojunction carried out via thermal oxidizing the crystal substrate at the different temperature and time regimes. Heterojunction high quality is confirmed with the help of current-voltage characteristics measurements. Optimal technological conditions of heterojunction manufacturing is established.

У даній роботі з метою одержання якісних гетеропереходів оксид-*p*-InSe досліджувались оптимальні умови їх виготовлення. Раніше нами було показано [1], що окислення моноселеніда індія приводить до утворення на його поверхні власного оксиду подібного, по властивостям, до In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Володіючи одночасно високою провідністю і прозорістю така плівка оксиду приводить до утворення гетеропереходу лише з кристалами *p*-типу провідності. Виникнення енергетичного бар'єру на гетеромержі з кристалами InSe *n*-типу не спостерігається.

Специфіка росту кристалів InSe методом Бріджмена, неодноразово повторювана експериментально, полягає в тому, що у більшості випадків легуюча домішка відганяється на кінець злитка. Тобто існує проблема керованого легування таких кристалів. З іншого боку, ріст кристалу стехіометричного складу приводить до виникнення надмірної кількості блоків у злитку.

Тому, для одержання кристалів потрібної досконалості та типу провідності використовувалась методика нестехіометричного росту InSe [2] та легування його домішками II групи періодичної системи елементів - кадмієм і цинком [3,4]. Результати електрофізичних параметрів вироблених нами кристалів представлені в таблиці 1.

В якості підкладок при виготовленні гетеропереходів використовувались кристали з параметрами, що зазначені в таблиці 1 під номером 3. Це пов'язано з тим, що крім відповідного типу провідності вони повинні володіти досить низьким опором, що визначає величину струму через гетероперехід. Зазначені кристали *p*-InSe окислювались на повітрі протягом 1, 2, 5, 10, 20, 50 хвилин при температурах 200, 300, 400 і 500°C; по два зразки для кожного режиму окислення. Окислені зразки обрізались і сколювались від можливих закортоток, після чого наносились індієві контакти. На виготовлених таким чином

Таблиця 1. Електричні властивості монокристалів InSe при кімнатній температурі. Індеси  $\perp c$ ,  $\parallel c$  - відповідають вимірам, проведеним у двох взаємно перпендикулярних орієнтаціях відносно кристалографічної осі *C*.

| № | Сполука                                    | Тип провідності | $n, p, \text{см}^{-3}$ | $\mu_{\perp c}, \text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ | $\sigma_{\parallel c}, \text{Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ | $\sigma_{\perp c}, \text{Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ | $A=\sigma_{\perp c}/\sigma_{\parallel c}$ |
|---|--|-----------------|------------------------|--|---|---|---|
| 1 | In <sub>1,05</sub> Se <sub>0,95</sub>      | <i>n</i>        | $1,5\cdot 10^{15}$     | 940  | $1,18\cdot 10^{-2}$                                       | $1,25\cdot 10^{-1}$                                   | 19  |
| 2 | InSe<Cd>                                   | <i>p</i>        | $5,2\cdot 10^{13}$     | 51   | $4,1\cdot 10^{-6}$  | $4,24\cdot 10^{-4}$                                   | 102                                       |
| 3 | In <sub>1,05</sub> Se <sub>0,95</sub> <Cd> | <i>p</i>        | $2\cdot 10^{14}$       | 63   | $5,2\cdot 10^{-5}$  | $2,14\cdot 10^{-3}$                                   | 41  |
| 4 | InSe<Zn>                                   | <i>p</i>        | $5,0\cdot 10^{13}$     | 28   | $9,0\cdot 10^{-6}$  | $2,24\cdot 10^{-4}$                                   | 24,9                                      |

гетеропереходах оксид-*p*-InSe вимірювалась фото-е.р.с. при освітленості  $\sim 100$  мВт/см<sup>2</sup>. Результати вимірювань представлені в таблиці 2, де відібрані тільки ті зразки, що володіли максимальною напругою холостого ходу. З таблиці 2 видно, що при різних температурах великої розбіжності у величині  $U_{xx}$  не існує, проте час окислення зразків суттєво відрізняється.

Щоб з'ясувати вплив режимів формування гетеропереходів на їх якість, нами досліджувались вольт-амперні характеристики зразків при прямому зміщенні. Як відомо [5], в цьому випадку залежність між струмом і напругою є експоненційною, а максимальний показник експоненти спостерігається у випадку ідеальних діодів, зокрема, коли фактор ідеальності  $n=1$ . Відхилення від ідеальної ВАХ має місце при: а) зміні механізму протікання струму через *p-n*-перехід; б) впливі шунтуючих струмів, які викликані дефектами бар'єру; в) наявності діелектричного прошарку. В кожному із цих випадків  $n > 1$ .

На рис.1 показані прямі гілки ВАХ гетеропереходів, фотоелектричні параметри яких приведені в таблиці 2. Добре видно, що в напівлогарифмічному масштабі вони лінійні з двома

Таблиця 2. Максимально досягнута величина напруги холостого ходу гетеропереходів оксид-*p*-InSe при різних режимах їх формування.

| $t, ^\circ\text{C}$          | 200  | 300  | 400  | 500  |
|------------------------------|------|------|------|------|
| $t_{\text{окис}}, \text{хв}$ | 10   | 5    | 5    | 1    |
| $U_{xx}, \text{В}$           | 0,41 | 0,53 | 0,44 | 0,49 |

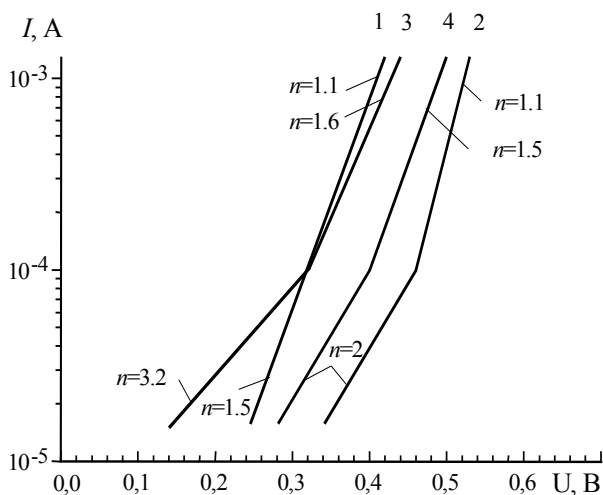


Рис.1. Прямі гілки вольт-амперних характеристик гетеропереходів оксид-*p*-InSe при кімнатній температурі: 200°C, 10 хв (1); 300 °C, 5 хв (2); 400 °C, 5 хв (3); 500 °C, 1 хв (4).

нахилами. По кожному нахилу ВАХ були визначені коефіцієнти  $n$ , які вказані на рис.1. Залежності  $I(U)$ , які описуються  $n=1$ , відповідають дифузійному механізму проходження струму через бар'єр, а  $n=2$  - рекомбінаційному. Одночасне протікання дифузійного та рекомбінаційного струмів може приводити до  $n$ , що лежить між 1 та 2. Спостереження обох механізмів протікання струму через гетероперехід, зокрема, при 300°C та зміна рекомбінаційного струму на дифузійний вказують на високу їх якість. Така зміна раніше спостерігалась для дифузійних кремнієвих діодів [5]. При цьому наявність зазначених вище факторів б) і в) можлива, але не суттєва. Нижчої якості гетеропереходи з  $n=1,5 \div 1,6$ , та  $n=3,2$ , тому що вони володіють значно вищими струмами насичення.

Таким чином, в результаті проведених досліджень встановлено:

1. Можливість одержання досконалих кристалів моноселеніда індія заданого типу провідності та концентрації основних носіїв заряду.

2. На основі *p*-InSe можна формувати високоякісні гетеропереходи і визначено оптимальні режими такого формування.

3. Перевагою представленої методики виготовлення гетеропереходів перед традиційною є, по-перше, те, що відповідає необхідність підготовки та захисту поверхні підкладок, так як в шаруватих кристалах вона є одночасно природнім дзеркальним сколом та інертна в оточуючому середовищі в силу слабкого хімічного зв'язку між шарами, а, по-друге, процес окислення не потребує складного устаткування та контролю, так як здійснюється при відносно невисоких температурах, що здешевлює їх виробництво.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Катеринчук В.Н., Ковалюк М.З. Гетеропереходи из InSe, сформированные термическим окислением кристаллической подложки // Письма в ЖТФ. - 1992. - **18**, №12. - С.70-72.
2. Chevy A., Kuhn A., Martin M.-S. Large InSe Monocrystals Growth from a Non-Stoichiometric Melt // Cryst. Growth. - 1977. - **38**, No. 1. - P.118-122.
3. Chevy A. Segregation of Dopants in Melt-Grown Indium Selenide Crystals // J. Appl. Phys. - 1984. - **56**, No. 4. - P.978-982.
4. Micocci G., Molendini M., Tepore A. Investigation of the Electrical Properties of Cd-Dopend Indium Selenide // J. Appl. Phys.- 1991.- **70**, No. 11.- P. 6847-6853.
5. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В2-х книгах. Пер. с англ. - М.: Мир, 1984. Кн. 1.