

## ГЕТЕРОПЕРЕХОДИ $\text{In}_2\text{Se}_3\text{-GaSe}$

Представлено результати дослідження електричних властивостей вперше створеної гетероструктури  $\text{In}_2\text{Se}_3\text{-GaSe}$ . Показано, що електричні властивості гетеропереходів залежать від способу виготовлення. На основі дослідження вольт-амперних характеристик встановлено механізми струмопереносу у структурі в прямому і оберненому напрямках. Зроблено висновок про перспективність використання досліджуваної структури в якості радіаційно стійких фоточутливих приладів.

The results of electrical properties studying of firstly received  $\text{In}_2\text{Se}_3\text{-GaSe}$  heterojunction's are discussed. It is shown that the electrical properties of heterojunction depend on the way of preparing. The current transport mechanisms in the direct and reverse directions are established on the base of current-voltage characteristic investigations. The conclusion about perspectives of this structure using as a radiation stable photosensitive device is made.

### Вступ

Селеніди галію GaSe та індію  $\text{In}_2\text{Se}_3$  належать до широкого класу шаруватих кристалів. Якщо перший з них – добре відомий напівпровідник, на основі якого створено ряд фоточутливих діодних структур, то останній – мало досліджений матеріал. В літературі існує всього декілька робіт присвячених вивченню його оптичних та електричних властивостей [1,2]. Відмінна риса  $\text{In}_2\text{Se}_3$  – значна дефектність, а, отже, і підвищена радіаційна стійкість. З огляду на цю обставину, значний практичний інтерес становить можливість створення фоточутливих структур із застосуванням цього матеріалу. У даній роботі представлено результати дослідження електричних властивостей вперше створеного гетеропереходу (ГП)  $\text{In}_2\text{Se}_3\text{-GaSe}$ .

### Експериментальні результати та їх обговорення

Для виготовлення ГП використовувався *n*- $\text{In}_2\text{Se}_3$  зі структурою гексагональної  $\alpha$ -фази, шириною забороненої зони  $E_g=1,45$  eV [1], з концентрацією основних носіїв  $n=2 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>. В якості контактуючого матеріалу було використано моноселенід галію *p*-типу ( $p \sim 10^{14}$  см<sup>-3</sup>). Поверхня  $\text{In}_2\text{Se}_3$  значно відрізняється від дзеркальної поверхні інших шаруватих напівпровідників. На жаль, для шаруватих напівпровідників, які по своїй твердості значно відрізняються від класичних напівпровідників Si і Ge, на сьогоднішній день не розроблено технології приготування поверхні. Тому

ГП виготовлялися двома способами: методом оптичного контакту, а також, для усунення впливу дефектності поверхні  $\text{In}_2\text{Se}_3$ , методом вакуумного напилення останнього на свіжо сколені підкладки GaSe. Струмові контакти створювалися за допомогою In-Ga амальгами з подальшим вплавленням індію і контакту на основі срібної пасти зі сторони GaSe. Виготовлені у такий спосіб структури, володіли яскраво вираженими діодними властивостями в широкому діапазоні температур – за напруги 1,5-2 В прямий струм перевищує обернений більш ніж у  $10^3$  раз (для обох способів приготування структур) – і є перспективними для використання в якості фоточутливих приладів. Так, наприклад, при освітленні гетеропереходів світлом потужністю 100 мВт/см<sup>2</sup> напруга холостого ходу дорівнювала  $\sim 0,35$  і  $\sim 0,7$  В для структур створених методом оптичного контакту і методом вакуумного напилення, відповідно. На рис.1 представлено зонні діаграми гетероструктури  $\text{In}_2\text{Se}_3\text{-GaSe}$ . Оскільки концентрація дірок у GaSe на два порядки менша концентрації електронів у  $\text{In}_2\text{Se}_3$ , то можна вважати, що область просторового заряду повністю розміщена у моноселеніді галію.

Дифузійний згин зон визначався вимірюванням *C-V* характеристик за методикою, описаною у роботі [3]. Положення рівня Фермі в GaSe і  $\text{In}_2\text{Se}_3$  визначалося за формулами роботи [4]:

$$E_F - E_V = kT \ln(N_V/p), \quad E_C - E_F = kT \ln(N_C/n),$$

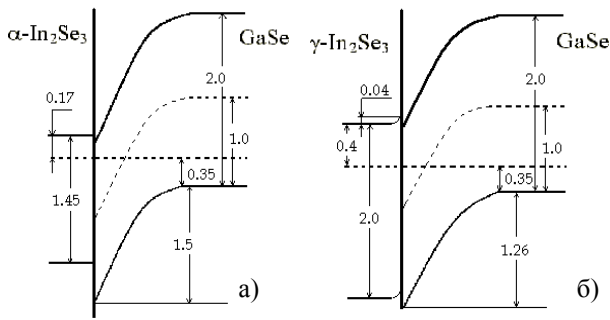


Рис.1. Зонна діаграма гетеропереходів  $\text{In}_2\text{Se}_3\text{-GaSe}$ , виготовлених методом оптичного контакту (а) та методом вакуумного напilenня (б). Всі величини вказані в електрон-вольтах.

де  $p$  і  $n$  – концентрації дірок в  $\text{GaSe}$  і електронів в  $\text{In}_2\text{Se}_3$  при кімнатній температурі,  $E_F, E_V, E_C$  – енергетичне положення рівня Фермі і валентної зони  $\text{GaSe}$  та зони провідності  $\text{In}_2\text{Se}_3$ , а також  $N_V=2(2\pi m_p kT/h^2)^{3/2}$ ,  $N_C=2(2\pi m_n kT/h^2)^{3/2}$  – ефективна густина станів у валентній зоні  $\text{GaSe}$  та зоні провідності  $\text{In}_2\text{Se}_3$ ,  $m_p=1,34m_0$  – ефективна маса дірок для  $\text{GaSe}$  [5],  $m_n=0,24m_0$  – ефективна маса електронів для  $\text{In}_2\text{Se}_3$  [6]. При побудові зонної діаграми гетероструктури  $\text{In}_2\text{Se}_3\text{-GaSe}$  враховувався той факт, що одержані у результаті термічного осадження плівки  $\text{In}_2\text{Se}_3$  мали  $\gamma$ -модифікацію з  $E_g=2,0$  еВ [1]. Тому гетероструктурам  $\text{In}_2\text{Se}_3\text{-GaSe}$ , створеним методом оптичного контакту та вакуумного напilenня будуть відповідати різні енергетичні діаграми (рис.1а,б), що і приводить до різниці в електричних характеристиках гетеропереходів, виготовлених різними способами. Для визначення механізму проходження струму у гетеропереходах проводилося вимірювання вольт-амперних характеристик у прямому і оберненому напрямках. Вимірювання проводилися за допомогою амплітудно-частотної аналізатора  $H.F. FRA 1255 \& 1286$ .

**Гетеропереходи, створені методом оптичного контакту**

В області прямих зміщень (0,1-0,6 В), коли падінням напруги на базовому напівпровіднику можна знехтувати, ВАХ ГП описується експоненційним законом:  $I \sim \exp(eU/nkT)$ , де діодний коефіцієнт  $n=2$  в усьому інтервалі досліджуваних температур (рис.2а), що, згідно теорії Саа-Нойса-Шоклі [7], відповідає рекомбінації в області просторового заряду (ОПЗ) при малих рівнях інжекції. Проте, знайдена із нахилу температурної залежності струму насичення енергія, не рівна половині ширини забороненої зони  $\text{GaSe}$  ( $E_g/2=1\text{eV}$ ), а становить  $0,56 \pm 0,58$  еВ, що значно менше очікуваної величини. Така різниця пояснюється тим,

що рекомбінація в ОПЗ йде не через прості одиничні центри, а через донорно-акцепторні пари. В цьому випадку температурна залежність струму має вигляд:  $I \sim \exp[-(E_g - \Delta E_t)/2kT] = \exp(-E'_g/2kT)$ , де  $\Delta E_t$  – енергетичне положення домішкового рівня. Враховуючи експериментальні значення  $E'_g \approx 1,16$  еВ, отримуємо глибину залягання рівня  $\Delta E_t = E_g - E'_g \approx 0,84$  еВ. Повний обернений струм при  $|U| > 3kT$  обумовлений сумою генераційного струму в збідненій області і дифузійного струму в нейтральній області  $\text{GaSe}$ , яка прилягає до ОПЗ [8]:  $I = q(D_n/\tau_e)^{1/2}(n_i^2/p) + qn_i W/\tau_e$ , де  $D_n$  – коефіцієнт дифузії електронів в  $\text{GaSe}$ ,  $n_i$  – власна концентрація носіїв струму у базовому напівпровіднику при  $T=300$  К,  $\tau_e$  – час життя неосновних носіїв струму в  $\text{GaSe}$ . Оскільки насичення не характерне для генераційних струмів, то при оберненому зміщенні  $|U| \geq 1$  В при кімнатній температурі (рис.3) домінуючим механізмом струмопереносу є дифузія електронів із  $\text{GaSe}$  в  $\text{In}_2\text{Se}_3$ . Ділянка, на якій обернений струм виходить на насичення, –

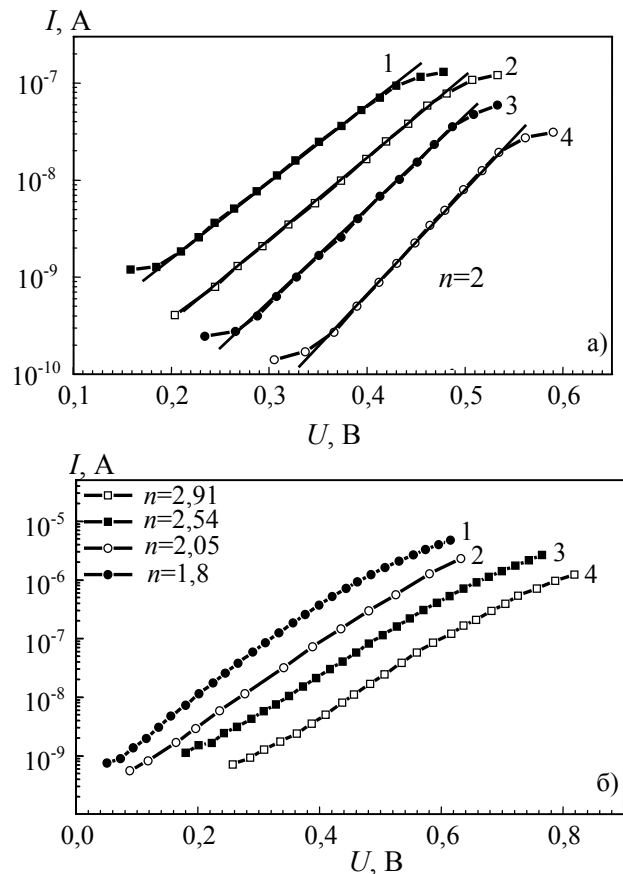


Рис.2 Прямі вітки вольт-амперних характеристик гетеропереходу  $\text{In}_2\text{Se}_3\text{-GaSe}$ , виготовленого методом оптичного контакту (а) і методом вакуумного напilenня (б) при різних температурах: 330 К (1), 300 К (2), 274 К (3), 240 К (4).

характерна для дифузії в структурах з товстою базою [9]. Проте, як відомо із збільшенням температури вклад дифузійних струмів у загальний струм мав би зростати, і при збільшенні температури ми мали би спостерігати більш протяжні ділянки насичення [10]. Експериментальні дані в нашому випадку свідчать про протилежне (рис.3). Найбільша ділянка струму насичення спостерігається при  $T=240$  К, а при температурах вище кімнатних ВАХ не виходить на насичення. Тому слід припустити, що в обернений струм свій внесок робить як тунелювання, так і струми втрат. Ділянки, коли домінуючим механізмом струмопереносу при оберненому зміщенні стає тунелювання, спостерігаються при збільшенні оберненої напруги до 3–3,5 В для різних партій зразків, що цілком логічно, адже при збільшенні оберненого зміщення потенційний бар'єр стає тоншим, а, отже, імовірність тунелювання неосновних носіїв струму з  $\text{In}_2\text{Se}_3$  збільшується.

#### Гетеропереходи, створені методом вакуумного напилення

В цьому випадку значення діодного коефіцієнта не однакове для всього досліджуваного температурного інтервалу (рис.2б). При кімнатній температурі  $n=2,05$ , що, як і для оптичного контакту, відповідає рекомбінації в ОПЗ. При пониженні температури до  $T=240$  К діодний коефіцієнт близький до 3, і домінуючим механізмом струмопереносу стає тунелювання. При температурах вищих кімнатної ( $n=1,8$ ) помітним стає надбар'єрний струм електронів із  $\text{In}_2\text{Se}_3$  у GaSe, що цілком закономірно, адже перед ними знаходиться менший потенційний бар'єр ніж у випадку, коли ГП створювався методом оптичного контакту. В оберненому напрямку струм слабо залежить від температури, але разом з тим спостерігається сильна польова залежність. Такий характер поведінки струму притаманний тунельному механізму переносу носіїв заряду [11]. Причому обернені вітки можуть бути апроксимовані виразом  $I \sim U^m$  і мають дві ділянки в залежності від прикладеного зміщення. При  $T=330$  К і  $|U| < 1,7$  В  $m_1=2$ , а при більш високих напругах  $m_2=5$ , що, загалом, відповідає м'якому пробою (крива 5 на рис.3).

Незважаючи на значну дефектність поверхні  $\text{In}_2\text{Se}_3$ , на його основі можливе створення поверхнево бар'єрних фоточутливих структур з добре відтворюваними електричними характеристиками, які залежать від технології приготування гетеропереходів. Створені структури – перспективні для використання в якості радіаційно стійких фоточутливих елементів для видимого та ближнього ІЧ спектрального діапазону.

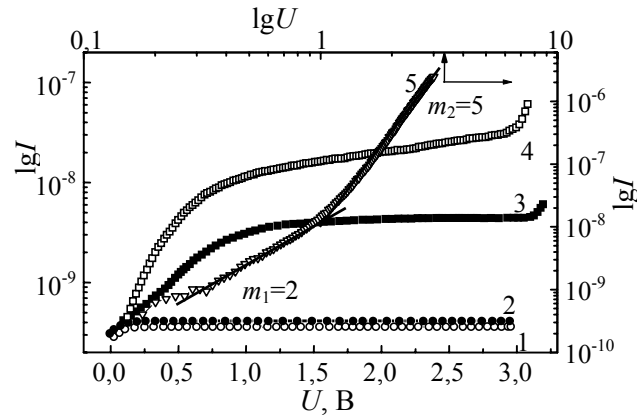


Рис.3 Обернені вітки вольт-амперних характеристик гетеропереходу  $\text{In}_2\text{Se}_3$ -GaSe, виготовленого методом оптичного контакту при різних температурах: 240 К (1), 274 К (2), 300 К (3), 330 К (4) та методом вакуумного напилення (5) при  $T=330$  К

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Julien C., Eddrief M., Balkanski M., Hatricraniotis E., Kambas K. Electrical transport properties of  $\text{In}_2\text{Se}_3$  // Phys. Stat. Sol. - 1985. - **88A**, No.2. - P.687-695.
2. De Beasi C., Drigo A.V., Micocci G., Tepore A. Preparation and characterization of  $\text{In}_2\text{Se}_3$  // J. Cryst. Growth. - 1989. - **94**, No.2. - C.455-458.
3. Goodman A.M. Metal-semiconductor barrier height measurement by the differential capacitance method - one carrier system // J.Appl. Phys. - 1963. - **34**, No.2. - P.329-338.
4. Бонч-Бруевич В.Л., Калашиников С.Г. Физика полупроводников. - М.: Наука, 1965.
5. Landolt-Bornstein. Numerical data and functional relationships in science and technology new ser. group III: Crystal and solid state physics. **17**, sv. F / Ed. by Madelung O. - Berlin: Springer, 1983.
6. Micocci G., Tepore A., Rella R., Siciliano P. Electrical characterization of  $\text{In}_2\text{Se}_3$  single crystals // Phys. Stat. Sol. - 1991. - **126A**, No.2. - P.437-442.
7. Sah C.T., Noyce R.N., Shockley W. Carrier generation and recombination in p-n junction characteristics // Proc. IRE. - 1957. - **45**. - P.1228.
8. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. - М.: Мир, 1982.
9. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы. - М.: Высшая школа, 1987.
10. Орешкин П.Т. Физика полупроводников и диэлектриков. - М.: Высшая школа, 1977.
11. Булярский С.В., Грушко Н.С. Генерационно-рекомбинационные процессы в активных элементах. - М.: МГУ, 1995.