

## ЕФЕКТ ПІДСИЛЕННЯ ФОТОСТРУМУ В ГЕТЕРОСТРУКТУРІ $\text{In}_2\text{O}_3\text{-GaSe}$

У гетероструктурі  $\text{In}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{-GaSe}$  з локалізацією площини бар'єра перпендикулярно осі симетрії  $C$  базового напівпровідника виявлено значне внутрішнє підсилення фотоструму. При цьому величина коефіцієнта підсилення досягає  $M \approx 80$ , а абсолютне значення струмової чутливості  $30 \text{ А/Вт}$ . Зображено зонну діаграму гетеропереходу з тунельно-прозорим шаром діелектрика. На основі дослідження вольт-амперних характеристик встановлено механізми струмопереносу через діелектрик у прямому і оберненому напрямках. Зроблено висновок про перспективність використання досліджуваної структури як високоефективний фотодіод для  $0,48\text{-}0,63 \text{ мкм}$  діапазону.

We have observed the considerable internal strengthening of photocurrent in the  $\text{In}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{-GaSe}$  heterostructure with the barrier prepared on the plane, perpendicular to the symmetry axis  $C$  of the base semiconductor. The coefficient of a photocurrent strengthening  $M$  takes the value about of 80. The absolute magnitude of the current sensitivity is  $30 \text{ A/W}$ . The view of the energy band diagram for the heterojunction is presented. Starting from the current - voltage characteristic the mechanisms of current transport through the dielectric layer in the direct and reverse directions are established. The conclusion about the possibility to use this device as a high - performance photodiode in the  $0.48$  to  $0.63 \text{ }\mu\text{m}$  range is made.

Дослідженню ряду явищ, що виникають у гетеропереході (ГП)  $\text{In}_2\text{O}_3\text{-GaSe}$ , завдяки введенню тонкого шару діелектрика  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ , присвячені роботи [1, 2]. У даній роботі вперше представлено результати дослідження гетероструктури, яка володіє значним внутрішнім підсиленням фотоструму, в якій роль тонкого діелектрика виконує власний окисел  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  з провідністю, близькою до власної.

Виготовлення гетероструктури полягало в послідовному нанесенні на площину, паралельну осі  $C$  монокристалічного селеніду галія  $p$ -типу ( $p \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ) (у тому випадку, коли  $\text{GaSe}$  виростає блочним монокристалічними блоками з дзеркальними поверхнями спайності вищезазначеної орієнтації трапляються досить часто) шару діелектричного окислу  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  товщиною  $\sim 5 \text{ нм}$  і шару прозорого триокислу індію з сильно виродженим газом вільних електронів ( $n \approx 10^{21} \text{ см}^{-3}$ ). Шар  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  вирощувався на повітрі при  $t=400^\circ\text{C}$  впродовж 10 хвилин. Його товщина контролювалася лазерним еліпсометром ЛЭМ-2. Шар  $\text{In}_2\text{O}_3$  створювався шляхом пульверизації спиртового розчину хлорного індію при тій самій температурі безпосе-

редньо після нарощування діелектрика. Площа бар'єрного контакту складала  $8 \div 10 \text{ мм}^2$ . Як омічні контакти використовувалися контактолі на основі срібної пасти.

Якісний вигляд зонної діаграми ГП з тонким діелектриком  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  зображено на рис. 1.

Величина поверхневого згину зон  $\varphi_0$  у селеніді галія визначалася із вольт-фарадних характеристик (ВФХ) [3], а положення рівня Фермі – за фор-

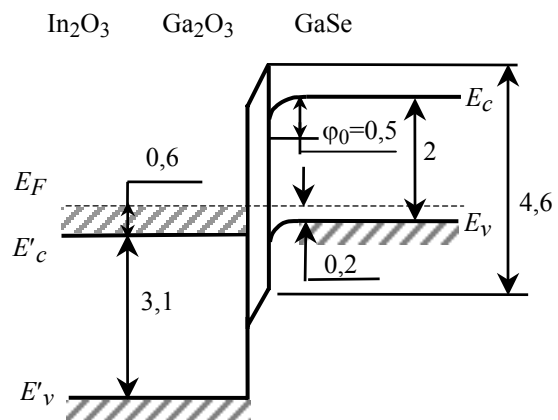


Рис.1. Зонна діаграма гетероструктури  $\text{In}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{-GaSe}$ . Всі величини вказані в електронвольтах.

мулою [4]:  $E_F - E_V = kT \ln(N_V/p)$ , де  $E_F$ ,  $E_V$  – енергетичне положення рівня Фермі та валентної зони базового напівпровідника,  $k$  – постійна Больцмана,  $T$  – абсолютна температура,  $p$  – рівноважна концентрація основних носіїв струму, а  $N_V$  – ефективна густина станів у валентній зоні визначалася із нахилу ВФХ. Параметри зонної структури і глибина залягання рівня Фермі в  $\text{In}_2\text{O}_3$  взято із роботи [5].

Для визначення механізму проходження струму через діелектрик проводилося вимірювання ВАХ у прямому і оберненому напрямках. У першому випадку пряме зміщення створювалося як з допомогою зовнішнього джерела живлення (темнова ВАХ), так і з метою запобігти спотворенню ВАХ через вплив нелінійності опору базової області напівпровідника, шляхом збудження носіїв заряду випромінюванням, яке поглинається в селеніді галію. Для цього використовувався GaP світлодіод з  $\lambda_{\text{max}}=560$  нм. Вимірювання залежності фотоструму від напруги холостого ходу  $U_{\text{хх}}$ , яка для досліджуваних структур становила 0,75-0,80 В при освітленні зразків світлом потужністю  $\approx 100$  мВт/см<sup>2</sup>, являє собою аналог прямої вітки ВАХ, з тією різницею, що відображає протікання електронних процесів безпосередньо в бар'єрній області реальної структури [6].

Така методика була особливо актуальною при дослідженні ГП з площиною бар'єра, розташованою паралельно шарам базового напівпровідника (перпендикулярно осі  $C$ ) [1, 2] через сильний вплив опору бази на вигляд ВАХ. У нашому випадку результати отримані в обидвох випадках вимірювання виявилися ідентичними. Отже, опором бази при прямому зміщенні  $U > \phi/q$  можна знехтувати. В прямому напрямку при напрузі  $U > 0,5$  В ВАХ описувалася виразом  $\lg I = f(U^{1/2})$ , характерним як для емісії Шоткі, так і для термоелектронної іонізації Пула-Френкеля. Однак вирахований кутовий коефіцієнт засвідчив, що механізмом струмопереносу через діелектрик у прямому напрямку є емісія Шоткі [7]. В оберненому напрямку початковий учасок ВАХ був лінійним, а при  $|U| > 1$  В струм експоненційно зростає із ростом напруги. Така залежність є типовою для тунельного проходження носіїв через бар'єр, утворений діелектриком.

Обернена вітка темної ВАХ гетероструктури представлена на рис.2а (крива 1). Вона не має чіткого насичення, що, загалом, є характерним для гетеропереходів. В області великих обер-

нених зміщень  $|U|=12-16$  В спостерігається слабо вироджена  $S$ -образність, притаманна тепловому пробою. Обернені вітки ВАХ структури при освітленні (рис.2а, криві 2-4) типові для МТДП структур із внутрішнім підсиленням фотоструму [8]. Про величину коефіцієнта підсилення ( $M \approx 80$ ) можна судити за результатами вимірювання залежності фотоструму  $I_{\text{ф}}$  від потужності випромінювання  $P$  (рис.2б). Характеристика вимірювалася при освітленні структури жовтим світлодіодом з  $\lambda_{\text{max}}=0,56$  мкм. Частота модуляції випромінювання складала 1кГц, опір навантаження 100 Ом, на структуру подавалося зміщення 10 В. З рисунка видно, що залежність  $I_{\text{ф}}(P)$  практично лінійна в широкому діапазоні, а абсолютне значення струмової чутливості досягає  $R = I_{\text{ф}}/P = 30-32$  А/Вт, що майже на два порядки перевищує значення, характерні для кремнієвих фотодіодів без внутрішнього підсилення фотоструму і досягає аналогічну величину для структури  $\text{In}_2\text{O}_3\text{-}\alpha\text{-Si: H-Si}$  при оберненому зміщенні  $U=6$  В, в якій реалізовано значне підсилення фотоструму [9].

Слід відмітити, що при фактичній ідентичності ВФХ і ВАХ при прямому зміщенні для структур, у яких площина бар'єра розміщена паралельно [1, 2] та перпендикулярно шарам базового напівпровідника, підсилення фотоструму реалізується лише в останніх. Причина такого феномену, очевидно, полягає в анізотропії властивостей моноселеніду галію.

По-перше, проходження струму в області просторового заряду для структур з площиною бар'єра, розміщеною паралельно шарам GaSe ( $\perp$  осі

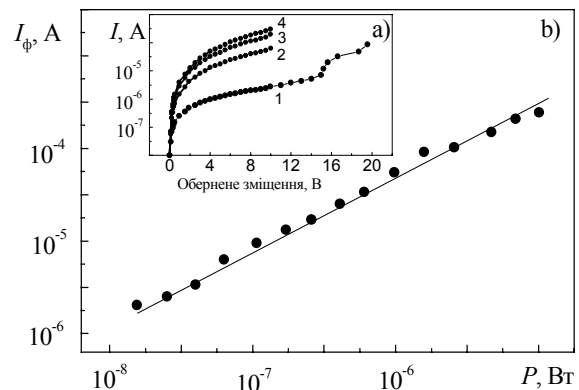


Рис.2. Залежність фотоструму  $I_{\text{ф}}$  від потужності падаючого випромінювання (b), обернені вітки ВАХ гетероструктури  $\text{In}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{-GaSe}$  (a): темнова вітка (1), при освітленні потужністю 1,5 мВт (2); 7 мВт (3); 13 мВт (4).

С), описується в рамках дифузійної теорії [10]. Тобто практично усі надлишкові носії струму, генеровані світлом у товщі базового напівпровідника, рекомбінують, не досягнувши площини бар'єра. Для досліджуваних структур, завдяки анізотропії електричних властивостей моноселеніду галія (рухливість основних носіїв струму  $\mu$  вздовж шарів у 6 разів більша, ніж у поперечному напрямку, а ефективна маса джок у 4 рази [11]),  $W \gg 2\phi_0 l / kT$  критерій справедливості дифузійної теорії [4], де  $W$  – товщина запірного шару,  $\phi_0$  – контактна різниця потенціалів,  $l$  – довжина вільного пробігу носіїв заряду, не виконується, оскільки обидві частини нерівності є величинами практично рівними. Отже, може бути поставлено запитання про зміну механізму провідності. В останньому випадку ймовірність того, що всі носії струму, генеровані у товщі базового напівпровідника, візьмуть участь у процесі струмопереносу значно зростає. По-друге, дифузійна довжина для структур, у яких площа бар'єра розміщена перпендикулярно шарам тільки за рахунок різниці величин часу життя неосновних носіїв  $\tau$ , визначених із кінетичних характеристик ( $\tau \sim 10^{-4}$  і  $10^{-2}$  с для випадку локалізації бар'єра паралельно і перпендикулярно шарам відповідно), на порядок більша, ніж у випадку локалізації бар'єра паралельно шарам GaSe.

Отже, досліджувана структура може бути використана не тільки як поляризаційно-чутливий датчик з коефіцієнтом плеохраїзму  $\sim 93\%$  [12], але й як високоефективний фотодіод у спектральному діапазоні 0.48-0.63 мкм.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Катеринчук В.Н., Ковалюк З.Д., Манассон В.А. Об одном из механизмов формирования фото-ЭДС в ПТДП-структурах // Физ. и тех. полупров. - 1987. - **21**, №11. - С.2094-2096.
2. Drapak S.I., Katerinchuk V.N., Kovalyuk Z.D. and Manasson V.A. The Injection Peculiarities of Minority Charge Carriers in the Anisotype SIS Structure // Phys. Stat. Sol. (a). - 1989. - **115**. - P.K35-K37.
3. Goodman A.M. Metal-Semiconductor Barrier Height Measurement by the Differential Capacitance Method - One Carrier System // J. Appl. Phys. - 1963. - **34**, №2. - P.329-338.
4. Бонч-Бруевич В.Л., Калашиников С.Г. Физика полупроводников. - М.: Наука, 1965.
5. Манассон В.А., Малик А.И., Товстюк К.Д. Особенности зонной диаграммы гетероперехода  $\text{In}_2\text{O}_3$ : Sn-n-Si // Физ. и тех. полупров. - 1984. - **18**, №12. - С.2121-2124.
6. Kuech T.F., Wu C.S., Lau S.S. The Measurement of Silicide Schottky Barrier Heights by Use of Photovoltaic Techniques. Thin Films and Interfaces // 2<sup>nd</sup> Symp., Boston, Mass. 14-18 Nov., 1983. - New York e.a., USA, 1984. - P. 663-668.
7. Орешкин П.Т. Физика полупроводников и диэлектриков. - М.: Высшая школа, 1977.
8. Вуль А.Я., Саченко А.В. Фотоэлектрические свойства структур металл-диэлектрик-полупроводник с туннельно-прозрачным слоем диэлектрика // Физ. и тех. полупров. - 1983. - **17**, №8, - С.1361-1376.
9. Баранюк В.Б., Комиссаров Г.П., Манассон В.А., Шустер Э.М. Эффект усиления фототока в гетероструктуре  $\text{In}_2\text{O}_3\text{-}\alpha\text{-Si}$ : H-Si // Физ. и тех. полупров. - 1988. - **22**, №4. - С.733-735.
10. Драпак С.И., Катеринчук В.Н., Ковалюк З.Д., Манассон В.А. Фотоэлектрические свойства гетероструктуры  $\text{In}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{-GaSe}$  с туннельно-тонким слоем диэлектрика // Препринт №5, Киев: ИПМ, 1989.
11. 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.
12. Manasson V.A., Kovalyuk Z.D., S.I.Drapak S.I. at al. Polarization-sensitive Photodiode for 632.8 nm Spectral Region // Electronic Letters. - 1990. - **26**, №10. - P.664.