

УДК 539.21:537.1

## Модифікація перехідного шару в структурах Si- Ge<sub>33</sub>As<sub>12</sub>Se<sub>55</sub>

М.І.Довгошей, О.Б.Кондрат, Р.М.Повч, Я.М.Поляк, Ю.І.Берцик  
*Ужгородський державний університет, вул.Підгірна, 46, 294000, м.Ужгород*

Структури Ge<sub>33</sub>As<sub>12</sub>Se<sub>55</sub> - X - n-Si (де X: Sb, Bi, In і Pb) одержані шляхом термічного осадження наночару X товщиною 100 нм на n-Si і послідуочим напиленням плівок Ge<sub>33</sub>As<sub>12</sub>Se<sub>55</sub> (1 мкм) методом дискретного термічного випаровування. Для дослідження електрофізичних властивостей цих структур було використано контакти із Al, нанесені термічним випаровуванням на обидві сторони структури. Дослідження вольт-амперних і вольт-фарадних характеристик проведено в області напруг від 0.01 до 1.00 В. В результаті досліджень встановлено, що наявність наночарів змінює умови переносу носіїв заряду через таку структуру, величину енергетичного бар'єра на межі поділу. Перенесення носіїв заряду з проміжними наночарами із Pb і Sb пов'язано як з процесом емісії, так і з процесом тунелювання через енергетичний бар'єр 0.44 еВ. Механізм переносу носіїв заряду через структуру з наночаром In може бути описаний в рамках моделі, яка враховує рекомбінацію і тунелювання через стани на межі поділу, енергетична величина якої складає 0.69 еВ.

**Ключові слова:** перехідний шар, гетероструктура, аморфна плівка, електрофізичні параметри, поверхневі стани.

*Стаття поступила до редакції 6.12.1999; прийнята до друку 10.12.1999*

### I. Вступ

Перехідний шар на границі розділу гетероструктур суттєво впливає на електрофізичні процеси, що відбуваються в них. Одним із можливих методів керування перехідною областю є її модифікація певними домішками. Границя поділу підкладка-плівка є об'єктом локалізації електрично активних дефектів, які виступають в ролі поверхневих станів, пасток, дислокацій і так далі [1]. Зменшуючи вплив цих дефектів можна суттєво покращити необхідні параметри. Тому було проведено модифікацію перехідного шару в структурах кремній-аморфна плівка Ge<sub>33</sub>As<sub>12</sub>Se<sub>55</sub> шляхом створення моношару Sb, Bi, In, Pb, на межі

поділу гетероструктури.

### II. Формування гетероструктур з модифікованим перехідним шаром

Плівки товщиною 1,0 мкм напилювалися [1] дискретним термічним випаровуванням стеклок Ge<sub>33</sub>As<sub>12</sub>Se<sub>55</sub> на непідігріті підкладки n-Si, на які попередньо наносилися термічним випаровуванням наночари X: In; Pb; Sb; Bi товщиною 10 нм. Швидкість осадження плівок складала 5,0 ± 0,1 нм/с. В ролі електродів використовувалися контакти, одержані шляхом термічного осадження алюмінію на обидві сторони такої структури.

### III. Експериментальні результати та їх обговорення

Більшість параметрів гетероструктур визначаються процесами переносу носіїв заряду на границі розділу аморфний напівпровідник-кристалічний напівпровідник [3]. Виходячи з цього при дослідженні структур  $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55} - \text{X} - \text{n-Si}$  (де X - In; Pb; Sb; Bi) велику увагу приділено вивченню вольт-амперних характеристик (ВАХ).

На рис.1 приведені в логарифмічних координатах вольт-амперні характеристики структур  $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55} - \text{X} - \text{n-Si}$  з проміжними наночарами X: In; Pb; Sb; Bi. Вимірювання виконані в області слабких електричних полів ( $10^2 - 10^4$  В/см). Тут же приведена характеристика без наночару (крива 1). Як видно, в області напруг  $U \leq 1$  В ( $E \leq 10^4$  В/см) вона лінійна і симетрична.

Наявність наночару In приводить до

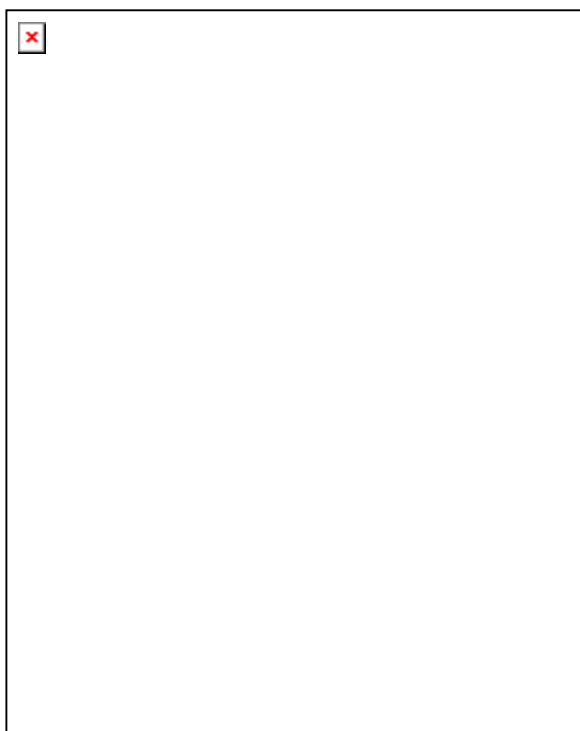


Рис. 1. Вольт-амперні характеристики гетероструктури  $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55} - \text{X} - \text{n-Si}$ . Криві 1, 1' - без перехідного наночару; 2, 2': X-In; 3, 3': X-Pb; 4, 4': X-Sb; 5, 5': X-Bi. Цифрами із штрихами позначені зворотні ділянки характеристик.



Рис. 2. Вольт-амперні характеристики гетероструктур з перехідним шаром, побудовані в координатах  $\lg I - U_a$  (кружечки) і  $\lg I - (U_a)^{1/2}$  (хрестики). Нумерація кривих відповідає позначенням на рис.1.

того, що вольт-амперна характеристика при напрузі більше 0,2 В стає надлінійною і залишається практично симетричною (криві 2, 2'). Порушення симетричності вольт-амперної характеристики структур відбувається при використанні наночарів із Pb (криві 3, 3') і Sb (криві 4, 4'). Найбільший коефіцієнт випрямлення ( $m \sim 80$  при  $U = 1$  В) спостерігається для структур із Bi, причому при зворотньому зміщенні їх вольт-амперна характеристика стає сублінійною. Наночар із Bi не впливає на лінійність і симетричність характеристики, однак струм, що протікає через таку структуру, значно зростає (криві 5, 5').

Для з'ясування механізму переносу носіїв заряду через досліджувані структури в області нелінійності вольт-амперних характеристик вони будувалися в різних координатах. На рис.2 приведені характеристики, побудовані в напівлогарифмічних координатах для структур з наночарами із In (криві 2, 2'), Pb (крива 3) і Sb (криві 4, 4'). Як видно із рис.2, для структур з наночарами із Pb і Sb вольт-амперні характеристики при прямому зміщенні (плюс прикладено до плівки ( $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ ) зпрямляються, якщо їх побудувати в координатах  $\lg I - U_a$  (криві 3, 4). Для структур з наночаром із In, а також для структур з наночаром із Sb вольт-

амперні характеристики зпрямлюються, якщо їх побудувати в координатах  $\lg I - (U_a)^{1/2}$  (криві 2, 2', 4').

Проводячи дослідження вольт-фарадних характеристик (ВФХ) гетеропереходу можна визначити енергетичний розрив зони провідності  $\Delta E_C$  і енергетичний розрив валентної зони  $\Delta E_V$ , а також оцінити концентрацію поверхневих станів на межі розділу [4].

На рис.3 приведені вольт-фарадні характеристики для структури  $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55} - X - n\text{-Si}$ , де X – In (крива 2); Pb (крива 3); Sb (крива 4); Bi (крива 5) і без проміжного наночару (крива 1). Як видно із рис.3, найбільш суттєва зміна ємності структур спостерігається при нанесенні на межу поділу наночару із Sb. Для таких структур також спостерігалася максимальна нелінійність вольт-амперних характеристик (рис.1, крива 3). Структури з перехідним наночаром із Pb (рис.3, крива 3) мають підвищене значення ємності при  $U_a = 0$ , а область початку її зменшення знаходиться при від'ємних значеннях напруги зміщення. Для цих структур вольт-амперні характеристики нелінійні, причому при зворотньому зміщенні спостерігається область насичення (рис.1, криві 3, 3'). Мінімальна зміна ємності структур при прикладенні напруги зміщення спостерігається при використанні наночарів із Bi і In (рис.3, криві 2, 5). Для цих структур вольт-амперні характеристики симетричні (рис.1, криві 2, 2', 5, 5').

На рис.4 для цих же структур приведені вольт-фарадні характеристики, побудовані в координатах  $1/C^2 - U_a$  для області залежності ємності від напруги зміщення ( $U_a$ ). Екстраполяція залежності  $C^{-2}$  від  $U_a$  до значення  $C^{-2}=0$  дозволила визначити величину контактної різниці потенціалів  $U_D$ .

Як видно з рис.4, величина  $U_D$  для різних структур різна. Для структур без наночару  $qU_D = 0,35$  eV (крива 1). Максимальне значення цієї величини отримано для структур з наночаром із Bi ( $qU_D = 0,80$  eV, крива 5), а мінімальне - для

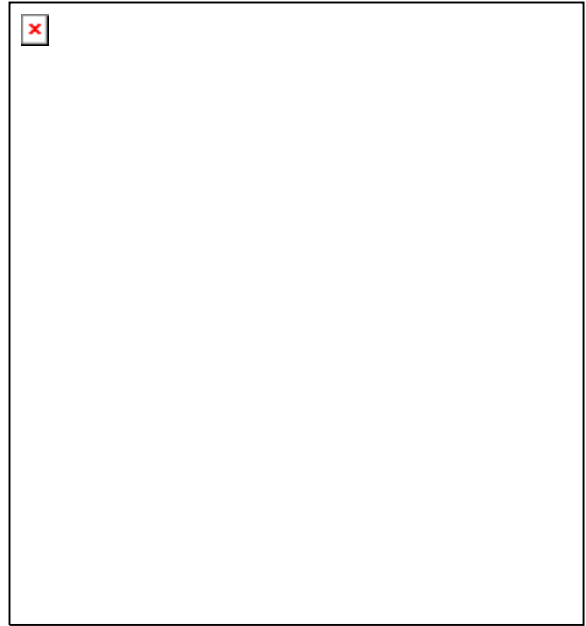


Рис.3. Вольт-фарадні характеристики гетероструктур  $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55} - X - n\text{-Si}$ , де X - In (крива 2); Pb (крива 3); Sb (крива 4); Bi (крива 5). Крива 1 відноситься до гетероструктури без наночару.

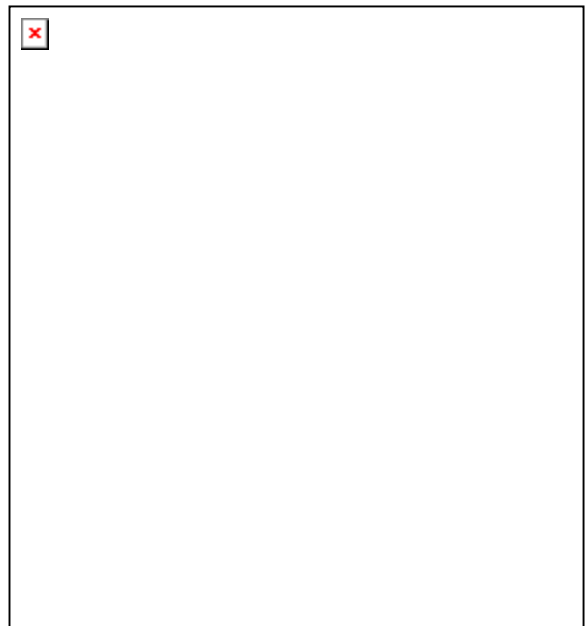


Рис.4. Вольт-фарадні характеристики, побудовані в координатах  $C^{-2} - U_a$ , гетероструктур  $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55} - X - n\text{-Si}$ , де X - In (крива 2,  $R=10^{-3}$ ); Pb (крива 3,  $R=10^{-7}$ ); Sb (крива 4,  $R=10^{-3}$ ); Bi (крива 5,  $R=10^{-5}$ ). Крива 1 відноситься до гетероструктури без наночару.

структури з нанощаром із In ( $qU_{Д2} = 0,15$  еВ, крива 2). При використанні в структурах нанощарів із Pb і Sb значення  $qU_{Д2}$  однакові і складають 0,60 еВ (криві 3, 4).

#### IV. Обговорення результатів

Вольт-амперні характеристики структур з нанощаром із In можуть бути описані в рамках моделі, яка враховує рекомбінацію і тунелювання через стани на межі поділу симетричного бар'єра [5], для якої густина струму описується виразом:

$$j = j_0 \exp(AU_a), \quad (1)$$

де  $A$  майже не залежить від температури і має відносно високе значення порівняно з множителем  $\eta$ , який входить у вираз, що описує струм при прямому зміщенні для рекомбінаційної моделі Долега [6]. Згідно з цією моделлю

$$j = j_0 \exp(qU_a / \eta kT), \quad (2)$$

де  $\eta$  мінється від 1 до 2 в залежності від відношення концентрації домішок.

Із рис.2 по величині кута нахилу вольт-амперних характеристик визначені емпіричний множник  $\eta$  і коефіцієнт  $A$ , вказаний нижче в дужках. Для структур з нанощарами із In і Pb вони відповідно рівні 7,47 (5,23) і 7,08 (5,47), а для структур з нанощарами із Sb при прямому зміщенні  $\eta=5,56$  ( $A=6,97$ ) і при зворотньому зміщенні  $\eta=9,10$  ( $A=4,25$ ). Шляхом екстраполяції прямих на рис.2 до  $U_a=0$  визначена густина потоку електронів  $j_0$  з боку металу в напівпровідник. Для досліджуваних структур з нанощаром із In а також з шаром

із Sb при прямому зміщенні її величина рівна  $j_0=1,1 \cdot 10^{-6}$  А/см<sup>2</sup>. Для структур з нанощаром із Pb при прямому зміщенні і структур з нанощаром із Sb при зворотньому зміщенні величина  $j_0 = 0,7 \cdot 10^{-6}$  А/см<sup>2</sup>.

Аналіз експериментальних результатів показав, що протікання струму в досліджуваних структурах не може бути пов'язано з процесами на межі поділу метал-напівпровідник, оскільки коефіцієнт  $\eta$  значно відрізняється від 1. Перенос носіїв заряду в структурах з нанощаром із Sb якісно може бути пояснений на основі моделі, яка враховує тунелювання на межі поділу між двома напівпровідниками, оскільки пряма і зворотня гілки їх вольт-амперної характеристики описуються відповідно формулами [4]:

$$j = j_0 \exp[-B(U_{\text{в}} - K_2 U_a)], \quad (3)$$

$$\text{і } j = j_0(-U_a) \exp[-C_q(U_{\text{в}} - U_a)^{1/2}], \quad (4)$$

де  $C$  - коефіцієнт, який враховує залежність ширини зони напівпровідника і енергії активації його домішкових рівнів від температури;  $K_2$  - коефіцієнт, який враховує падіння напруги в широкозонному напівпровідникові (позначений індексом 2).

Для структур з нанощаром із Pb вольт-амперні характеристики можуть бути описані в рамках класичної моделі Андерсона для гетеропереходів [7]. В даній моделі прямий струм  $I$  змінюється в залежності від прикладеної напруги  $U_a$  по експоненціальному закону згідно з виразом:

$$I = B \exp[qU_{\text{в}2} / kT] \exp(qK_2 U_a / kT), \quad (5)$$

де  $k$  - стала Больцмана,  $T$  - температура,  $U_{\text{Д}2}$  - викривлення зон в широкозонному напівпровідникові. Для зворотньої вітки вольт-амперної характеристики теорія передбачає насичення струму при великих напругах.

Значний ріст струму через структуру з нанощаром із Ві може бути пов'язаний з переходом від діркового типу провідності

до електронного типу провідності плівок  $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$  в результаті дифузії в неї атомів Ві.

Відомо, що для гетероструктур енергетичний розрив валентної зони визначається виразом [4]:

$$\Delta E_v = U_{\text{в}} + \delta_n + \delta_p - E_{gn}, \quad (6)$$

де  $\delta_n$  і  $\delta_p$  - відповідно енергія домішкового

рівня в напівпровідникові n і p-типу,  $E_{gn}$  - ширина забороненої зони напівпровідника n-типу. Для n-Si енергія домішкового рівня при легуванні його атомами фосфора рівна  $\delta_n = 0,044$  еВ [8]. Для Ge<sub>33</sub>As<sub>12</sub>Se<sub>55</sub> величина  $\delta_p \sim 0,9$  еВ, якщо прийняти, що дефектні центри знаходяться поблизу середини ширини оптичної зони  $E_{gp} = 1,80$  еВ [9]. Величина  $E_{gn}$  для Si рівна 1,11 еВ [4].

Використовуючи формулу (6), отримаємо слідуєчі значення  $\Delta E_v$ . Для структури без наночару  $\Delta E_v = 0,18$  еВ. Максимальне значення  $\Delta E_v = 0,64$  еВ отримано для структури з Ві, а мінімальне - для структури з Іп ( $\Delta E_v \sim 0$ ). При наявності на межі поділу наночарів із Pb і Sb величина  $\Delta E_v$  однакова і рівна 0,44 еВ. Для таких структур вольт-амперні характеристики не симетричні (рис.1, криві 3, 3' і 4, 4').

Енергетичний розрив зони провідності  $\Delta E_c$  для гетероструктур визначається з виразу [4]:

$$\Delta E_c = E_{gp} - E_{gn} - \Delta E_v. \quad (7)$$

Мінімальне значення  $\Delta E_c = 0,05$  еВ мають структури з наночаром із Ві. Якщо врахувати, що перенос носіїв заряду в такій структурі визначається потоком електронів, то стає зрозумілим значне збільшення струму (рис.1, крива 5, 5'), оскільки для

нього практично відсутній бар'єр на межі поділу. Максимальне значення  $\Delta E_c = 0,69$  еВ отримано для структур з наночаром Іп. Для структур без наночару одержано значення  $\Delta E_c = 0,51$  еВ, а з наночарами із Pb і Sb вони однакові і рівні 0,25 еВ. Слід відмітити, що і роботи виходу електронів для цих матеріалів приблизно однакові і складають, відповідно, 4,02 і 4,08 еВ.

## V. Висновки

Одержано якісне узгодження експериментальних даних при дослідженні вольт-амперних і вольт-фарадних характеристик структур аморфна плівка Ge<sub>33</sub>As<sub>12</sub>Se<sub>55</sub> - кристалічний напівпровідник n-Si з проміжним наночаром із Sb, Ві, Іп і Pb. Показано суттєвий вплив таких наночарів на механізм переносу носіїв заряду через досліджувані структури. Встановлено, що аксимальне значення величини контактної різниці потенціалів отримано для структур з наночаром із Ві ( $qU_D = 0,80$  еВ), а мінімальне - для структури з наночаром із Іп ( $qU_D = 0,15$  еВ). При використанні в структурах наночарів із Pb і Sb значення  $qU_D$  однакові і складають 0,60 еВ.

- [1] И.Э.Качер, Н.И.Довгошей и др., Получение тонких плёнок с переходным слоем и их оптические и механические свойства // *Рукопись деп. в Укр.НИИНТИ Ук-85 Деп.* 138, 18с. (1985).
- [2] С.В.Свечников, В.В.Химинец, Н.И.Довгошей, *Сложные некристаллические халькогениды и халькогалогениды и их применение в оптоэлектронике*, Наук. думка, Киев, (1992)
- [3] А.М.Андрееш и Д.И.Циуляну, *Электрофизические свойства гетеропереходов стеклообразный полупроводник - кристалл*, В кн.: Аморфные полупроводники- 78, сс. 601-608, Пардубице, (1978).
- [4] А.Милнс, Д.Фойхт, *Гетеропереходы и переходы металл - полупроводник*, Мир, Москва, (1975).
- [5] I.P.Donnely, A.G.Milnes, Current-voltage characteristics for Ge-Si and Ge-GaAs heterojunctions // *Proc. IEE (London)*, 113, p.1468 (1996).
- [6] V. Dolega, Theory of p-n - heterojunctions between semiconductors with variable crystalline lattices // *Zs. Naturforsch.*, 13, p.653 (1963),
- [7] R.L.Anderson, Experiments on Ge-GaAs heterojunction // *Solid-State Electron.* 5, pp.341-346 (1962).
- [8] К. Хогарт, *Кремний*. В кн. Материаллы, используемые в полупроводниковых приборах, Под ред. К. Хогарта, Мир, Москва, 348с. (1968).

- [9] N.Savchenko, T.Shchurova, A.Kondrat, N.Dovgoshey, Radiation stable infrared optical components // *Proc. of SPIE*. 3359, p. 87 (1998).

### **Transition layer modifikation in structures Si- $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$**

N.I.Dovgoshey, O.B.Kondrat, R.M.Povch, Ya.M.Polyak, Yu.I.Bertcik

$\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$  - X - n-Si structures (where X: Sb, Bi, In and Pb) were obtained by thermal deposition of X nanolayer with 10.0 nm thickness onto n-Si and subsequent flash evaporation of  $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$  films (1  $\mu\text{m}$ ). To study electrophysical properties of these structures Al contacts have been used, which were applied by thermal evaporation on both sides of the structure. Investigations of current-voltage and capacitance-voltage characteristics were performed in the range from 0.01 to 1.0 V. It was revealed that the presence of nanolayer changes the conditions of charge carrier transfer through the structure and the interface energy barrier value. Carrier transfer in heterostructures with intermediate Pb and Sb nanolayer is related to the emission process as well as to the process of tunnelling through the energy barrier of 0.44 eV. The mechanism of charge carrier transfer through the structure with In nanolayer can be described within the limits of a model which accounts for recombination and tunnelling through the interfacial states. The energy barrier in this case has been found to be 0.69 eV.