

ОПТИЧНІ, ОПТОЕЛЕКТРОННІ І РАДІАЦІЙНІ СЕНСОРИ OPTICAL, OPTOELECTRONIC AND RADIATION SENSORS

УДК 621.315.592: 546.81'23'24: 621.383.52

ІНФРАЧЕРВОНІ СЕНСОРИ НА ОСНОВІ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ ТВЕРДИХ РОЗЧИНІВ ХАЛЬКОГЕНІДІВ СВИНЦЮ-ОЛОВА

А. І. Ткачук, В. В. Тетьоркін, О. М. Царенко, С. І. Рябець, Ю. Г. Ковальов

*Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАНУ, м. Київ, Україна;
Кіровоградський державний педагогічний університет ім. В. Винниченка,
вул. Шевченка, 1, м. Кіровоград, 25006, E-mail: atkachuk08@meta.ua*

ІНФРАЧЕРВОНІ СЕНСОРИ НА ОСНОВІ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ ТВЕРДИХ РОЗЧИНІВ ХАЛЬКОГЕНІДІВ СВИНЦЮ-ОЛОВА

А. І. Ткачук, В. В. Тетьоркін, О. М. Царенко, С. І. Рябець, Ю. Г. Ковальов

Анотація. Методами рідинної епітаксії та термічного вакуумного напилення сформовані лінійки фотovoltaїчних інфрачервоних сенсорів на основі поверхнево-бар'єрних структур Au/ δ -шар/ n -Pb_{1-x}Sn_xTe_{1-y}Se_y (KCl, BaF₂)/Al(Pb) і Pb/ δ -шар/ p -Pb_{1-x}Sn_xTe_{1-y}Se_y/ p^+ -Pb_{0,80}Sn_{0,20}Te/Au. При температурі вимірювань $\sim 80 \div 170$ К, піковій довжині хвилі $\lambda_p \sim 8 \div 12,2$ мкм та довжині хвилі відсічки $\lambda_c \sim 8,3 \div 12,8$ мкм вони мали добуток диференціального опору при нульовому зміщенні на активну площу $R_0 A = 0,18 \div 2,72$ Ом·см², пікову квантову ефективність $\eta_\lambda = 0,28 \div 0,52$ та питому виявну здатність $D_{\lambda^*} = (0,61 \div 4,51) \times 10^{10}$ см·Гц^{1/2}·Вт⁻¹.

Ключові слова: халькогеніди свинцю-олова, рідинна епітаксія, поверхнево-бар'єрні структури, тонкий проміжний шар окислу

INFRARED SENSOR ON THE BASIS OF LEAD-TIN CHALCOGENIDE MULTICOMPONENT SOLID SOLUTIONS

A. I. Tkachuk, V. V. Tetyorkin, O. M. Tsarenko, S. I. Ryabets, Yu. G. Kovalyov

Abstract. The linear photovoltaic infrared sensor arrays have been formed on the basis of Au/ δ -layer// n -Pb_{1-x}Sn_xTe_{1-y}Se_y (KCl, BaF₂)/Al(Pb) and Pb/ δ -layer/ p -Pb_{1-x}Sn_xTe_{1-y}Se_y/ p^+ -Pb_{0,80}Sn_{0,20}Te/Au barrier-surface structures, which were obtained by the liquid phase epitaxy and thermal vacuum deposition techniques. At the $\sim 80 \div 170$ K, peak wavelength $\lambda_p \sim 8 \div 12,2$ μ m and cutoff wavelength $\lambda_c \sim 8,3 \div 12,8$ μ m they had the zero bias resistance area product $R_0 A = 0,18 \div 2,72$ $\Omega \cdot \text{cm}^2$, peak quantum efficiency $\eta_\lambda = 0,28 \div 0,52$ and peak detectivity $D_{\lambda^*} = (0,61 \div 4,51) \times 10^{10}$ cm·Hz^{1/2}·W⁻¹.

Keywords: lead-tin chalcogenide, liquid phase epitaxy, barrier-surface structures, thin intermediate oxide layer

ИНФРАКРАСНЫЕ СЕНСОРЫ НА ОСНОВЕ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ТВЁРДЫХ РАСТВОРОВ ХАЛЬКОГЕНИДОВ СВИНЦА-ОЛОВА

А. И. Ткачук, В. В. Тетёркин, О. Н. Царенко, С. И. Рябец, Ю. Г. Ковалёв

Аннотация. Методами жидкофазной эпитаксии и термического вакуумного напыления сформированы линейки фотовольтаических инфракрасных сенсоров на основе поверхностно-барьерных структур $Au/\delta\text{-слой}/n\text{-Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y$ (KCl , BaF_2)/ $Al(Pb)$ и $Pb/\delta\text{-слой}/p\text{-Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y/p^+\text{-Pb}_{0,80}\text{Sn}_{0,20}\text{Te}/Au$. При температуре измерений $\sim 80 \div 170170$ К, пиковой длине волны $\lambda_p \sim 8 \div 12,2$ мкм и длине волны отсечки $\lambda_c \sim 8,3 \div 12,8$ мкм они имели произведение дифференциального сопротивления при нулевом смещении на активную площадь $R_{\sigma}A = 0,18 \div 2,72$ Ом·см², пиковую квантовую эффективность $\eta_{\lambda} = 0,28 \div 0,52$ и удельную обнаружительную способность $D_{\lambda}^* = (0,61 \div 4,51) \times 10^{10}$ см·Гц^{1/2}·Вт⁻¹.

Ключевые слова: халькогениды свинца-олова, жидкофазная эпитаксия, поверхностно-барьерные структуры, тонкий промежуточный слой окисла.

Вступ

При розробці приладних структур інфрачервоної оптоелектроніки для діапазону довжин хвиль від 8 до 28 мкм на особливу увагу заслуговують вузькощілинні напівпровідники на основі багатокомпонентних твердих розчинів (БТР) сполук А4В6, що залишаються конкурентоспроможними в порівнянні з аналогічними на основі сполук А²В⁶ та А³В⁵ [1,2]. За останні роки знову зріс інтерес до інфрачервоних сенсорів на основі епітаксійних шарів (ЕШ) твердих розчинів халькогенідів свинцю-олова [3-5]. Застосування багатокомпонентних сполук дає можливість зміною складу регулювати ширину забороненої зони та параметр кристалічної решітки, а також в певних межах максимально узгоджувати параметри кристалічних решіток підкладки та нарощуваного шару. Поряд з цим, при побудові інфрачервоних детекторів, не менш важливою проблемою є вибір відносно недорогої та досить ефективної методики одержання високоякісних ЕШ – основи для формування фотодіодів Шотткі. Станом на сьогодні, рідинна епітаксія (РЕ) залишається одним з перспективних методів вирощування ізоперіодних ЕШ БТР $Pb_{1-x}Sn_xTe_{1-y}Se_y$ з низькою концентрацією носіїв струму при заданому складі і типі провідності, виключаючи легування [6-8].

Метою даного дослідження стали пошук та відпрацювання лабораторної методики формування інфрачервоних сенсорів з бар'єром Шотткі й тонким проміжним тунельно-прозорим діелектричним шаром власного окислу (δ -шаром) та надійними випрямляючими й омичними контактами метал/напівпровідник на основі високоякісних невідроджених ЕШ БТР $Pb_{1-x}Sn_xTe_{1-y}Se_y$, які узго-

дуються за параметром кристалічної решітки з напівпровідниковими та діелектричними підкладками, прозорими в діапазоні 0,3÷13 мкм.

Методика одержання структур

ЕШ БТР $Pb_{1-x}Sn_xTe_{1-y}Se_y$ вирощувались з обмеженого об'єму пересиченого розчину-розплаву $(Pb_{1-y}Sn_y)_{1-w}(Te_{1-u}Se_u)_w$ методом РЕ у вертикальному реакторі в потоці очищеного водню. В якості підкладок використовували монокристали (111) BaF_2 , (100) KCl і (100) $Pb_{0,80}Sn_{0,20}Te$ з поверхневою густиною дислокацій $N_d = (0,4 \div 9) \times 10^5$ см⁻². Підкладки мали форму шайби діаметром 20÷28 мм і товщиною 0,8÷2 мм. Температура ліквідусу становила 773÷873 К при швидкості програмного охолодження 0,1÷0,2 К/хв, діапазоні зниження температури 5÷15 К та вихідному переохолодженні 1÷3 К [9,10].

Одержані ЕШ були дзеркально-гладкими або мали легку терасну структуру, що можна пояснити незначною (0,1÷0,3°) розорієнтацією підкладок по відношенню до площини росту. При товщині 2÷11 мкм їх поверхнева густина дислокацій не перевищувала 10⁵ см⁻². Вихід таких шарів складав 70÷90 %.

На основі вирощених БТР $Pb_{1-x}Sn_xTe_{1-y}Se_y$, методом термічного вакуумного напылення при залишковому тиску $\sim 10^{-5}$ мм. рт. ст., за допомогою систем масок з нержавіючої сталі, були сформовані лінійки фотовольтаїчних інфрачервоних сенсорів з використанням поверхнево-бар'єрних структур (ПБС) трьох типів (див. рис. 1):

I – $Cu/Cr/Au/\delta\text{-шар}/n\text{-Pb}_{1-x}Sn_xTe_{1-y}Se_y(KCl)/Al/Cr/Cu$ на основі ЕШ з вмістом $0,15 \leq x \leq 0,26$ (ат. д.), $0,17 \leq y \leq 0,22$ (ат. д.), та концентрацією носіїв струму $n = (0,8 \div 2,5) \times 10^{17}$ см⁻³ і

холлівською рухливістю $\mu_H = (8,1 \div 10,2) \times 10^3 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ при $T \sim 80 \text{ К}$;

II – Pb/ δ -шар/ p -Pb_{1-x}Sn_xTe_{1-y}Se_y/ p^+ -Pb_{0,80}Sn_{0,20}Te/Au/Cr/Cu на основі ЕШ з вмістом $0,13 \leq x \leq 0,18$ (ат. д.), $0,02 \leq y \leq 0,04$ (ат. д.), та $p = (4,2 \div 7,5) \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ і $\mu_H = (0,9 \div 4,1) \times 10^3 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ при $T \sim 80 \text{ К}$;

III – Cu/Cr/Au/ δ -шар/ n -Pb_{1-x}Sn_xTe_{1-y}Se_y(BaF₂)/Pb на основі ЕШ з вмістом $0,05 \leq x \leq 0,11$ (ат. д.), $0,73 \leq y \leq 0,76$ (ат. д.), та $n = (1,1 \div 3,2) \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ і $\mu_H = (7,1 \div 10,1) \times 10^3 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ при $T \sim 80 \text{ К}$.

ПБС **I** і **III** типу (рис. 1, **а**, **в**) були одержані наступним чином. Після того як ЕШ БТР n -Pb_{1-x}Sn_xTe_{1-y}Se_y відпалювали у вакуумі при температурі підкладки $T_{\text{nid}} \sim 473 \text{ К}$ протягом $\sim 20 \div 30$ хвилин для десорбції поверхневого шару окислу, омичні контакти формували напиленням при $T_{\text{nid}} \sim 300 \text{ К}$ для ПБС **III** смуг Pb товщиною $d \sim 5000 \text{ \AA}$, а для ПБС **I** – шару Al ($d \sim 1000 \text{ \AA}$) на всю поверхню ЕШ, поверх якого, при $T_{\text{nid}} \sim 453 \div 473 \text{ К}$, послідовно напилювали шари Cr ($d \sim 500 \text{ \AA}$) і Cu ($d \sim 2000 \text{ \AA}$) та монтували всю структуру з боку мідного шару до мідного тепловідводу за допомогою 92 % Pb + 5 % Sn + 3 % Ag припою. Після цього підкладку KCl видаляли шляхом розчинення в дистильованій воді.

Для формування δ -шару товщиною $\sim 100 \div 200 \text{ \AA}$, вільну поверхню ЕШ піддавали термічному окисленню при $T_{\text{nid}} \sim 473 \text{ К}$ протягом ~ 2 хв. δ -шар необхідний для того, щоб при вакуумному напиленні металу випрямляючого контакту не відбувалась його пряма хімічна взаємодія з поверхнею БТР халькогенідів свинцю-олова, оскільки в цьому випадку в області контакту з'являється складна гетерофазна область, що містить продукти реакції металу і напівпровідника, причому в перехідній області завжди спостерігається виділення металевого олова. В такій системі можливе виникнення додаткових потенціальних бар'єрів, які перешкоджають ефективному розподілу фотонів [11].

Поверх δ -шару на всю поверхню ЕШ БТР n -Pb_{1-x}Sn_xTe_{1-y}Se_y при $T_{\text{nid}} \sim 523 \text{ К}$ напилювали ізоляційний шар SiO ($d \sim 5000 \text{ \AA}$), в якому залишали вікна $\sim 0,5 \times 0,5 \text{ мм}^2$. Для формування бар'єрів Шоттки у вікна в SiO поверх δ -шару при $T_{\text{nid}} \sim 473 \text{ К}$ напилювали: ПБС **I** – напівпрозорі бар'єрні електроди із Au ($d \sim 300 \text{ \AA}$); ПБС **III** – шар Au ($d \sim 1000 \text{ \AA}$).

На частину кожного сформованого електроду поверх ізоляційного шару SiO при $T_{\text{nid}} \sim 453 \div 473 \text{ К}$ послідовно напилювали смуги Cr ($d \sim 500 \text{ \AA}$) і Cu ($d \sim 6000 \text{ \AA}$) для створення контактних площадок, до яких за межами бар'єрних електродів монтували

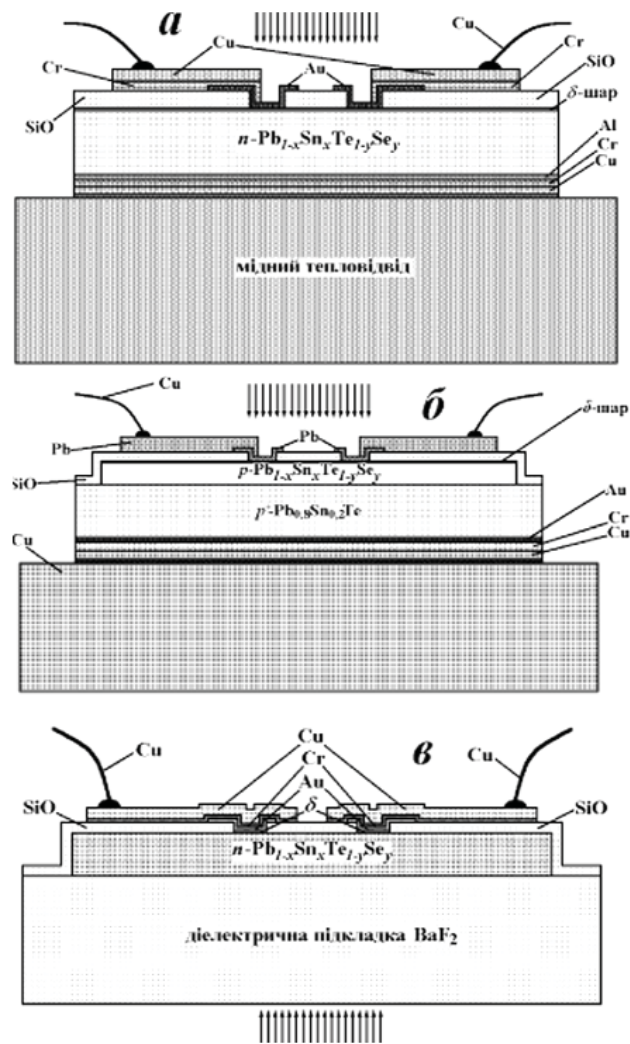


Рис. 1. Схематичне зображення фотовольтаїчних інфрачервоних сенсорів на основі ПБС: **а** – **I** – Cr/Cu/Au/ δ -шар/ n -Pb_{1-x}Sn_xTe_{1-y}Se_y (KCl)/Al/Cr/Cu; **б** – **II** – Pb/ δ -шар/ p -Pb_{1-x}Sn_xTe_{1-y}Se_y/ p^+ -Pb_{0,80}Sn_{0,20}Te/Au/Cr/Cu; **в** – **III** – Cu/Cr/Au/ δ -шар/ n -Pb_{1-x}Sn_xTe_{1-y}Se_y (BaF₂)/Pb.

мідні дротинки діаметром $\sim 0,1 \text{ мм}$ за допомогою 52 % In + 47 % Sn + 1 % Ag припою.

Для одержання ПБС **II** типу (рис. 1, **б**) гетероструктури p -Pb_{1-x}Sn_xTe_{1-y}Se_y/ p^+ -Pb_{0,80}Sn_{0,20}Te, з протилежного від вирощеного ЕШ боку, піддавали механічному шліфуванню з наступним хіміко-динамічним поліруванням при кімнатній температурі в 95 % HBr + 5 % Br₂ травнику до товщини підкладки $\sim 200 \text{ мкм}$. Для формування омичного контакту на всю поверхню підкладки p -Pb_{0,80}Sn_{0,20}Te, з протилежного від ЕШ боку, при $T_{\text{nid}} \sim 423 \div 473 \text{ К}$ послідовно напилювали шари Au ($d \sim 1000 \text{ \AA}$), Cr ($d \sim 600 \text{ \AA}$) та Cu ($d \sim 2000 \text{ \AA}$). δ -шар товщиною $\sim 100 \div 200 \text{ \AA}$ формували шляхом примусової оксидзації

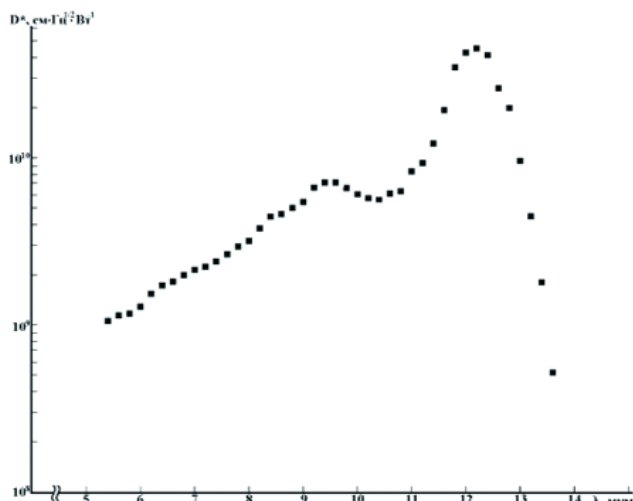


Рис. 2. Спектральна залежність питомої виявної здатності інфрачервоного сенсора на основі ПБС Au/ δ -шар/ n -Pb_{0,90}Sn_{0,10}Te_{0,26}Se_{0,74}(BaF₂)/Pb.

поверхні ЕШ протягом ~ 2 хв при $T_{nid} \sim 473$ К. Для формування бар'єрів Шотткі на всю поверхню БТР p -Pb_{1-x}Sn_xTe_{1-y}Se_y при $T_{nid} \sim 523$ К також напилювали ізоляційний шар окислу SiO ($d \sim 5000$ Å), в якому залишали вікна $\sim 0,5 \times 0,5$ мм². В ці вікна при $T_{nid} \sim 300$ К напилювали напівпрозорі бар'єрні електроди зі Pb ($d \sim 300$ Å). Потім, на частину кожного сформованого електроду поверх ізоляційного шару SiO напилювали смуги Pb товщиною ~ 10000 Å для створення контактних площадок. Після цього всю структуру з боку мідного шару кріпили до мідного тепловоду за допомогою 52 % In + 47 % Sn + 1 % Ag припою, а також монтували мідні дротинки діаметром $\sim 0,1$ мм до контактних площадок за межами бар'єрних електродів.

Виміри темнових вольт-амперних характеристик (ВАХ) проводили на постійному струмові при $\sim 80 \div 200$ К. Вольт-фарадні характеристики (ВФХ) досліджували мостовим методом на частоті 1 МГц. Питому виявну здатність поверхнево-бар'єрних структур вимірювали на установці К-54.410 з температурою підігріву абсолютно чорного тіла 500 К. Модуляція випромінювання здійснювалась механічним переривачем з частотою 800 Гц.

Результати та обговорення

Сформовані таким чином лінійки фотовольтаїчних інфрачервоних сенсорів при температурі фону $T_f \sim 300$ К мали наступні характеристики:

- 1) ПБС Au/ δ -шар/ n -Pb_{1-x}Sn_xTe_{1-y}Se_y(KCl)/Al – пікову довжину хвилі $\lambda_p \sim 8 \div 9,9$ мкм, довжину хвилі відсічки $\lambda_c \sim 8,5 \div 10,4$ мкм, добуток дифе-

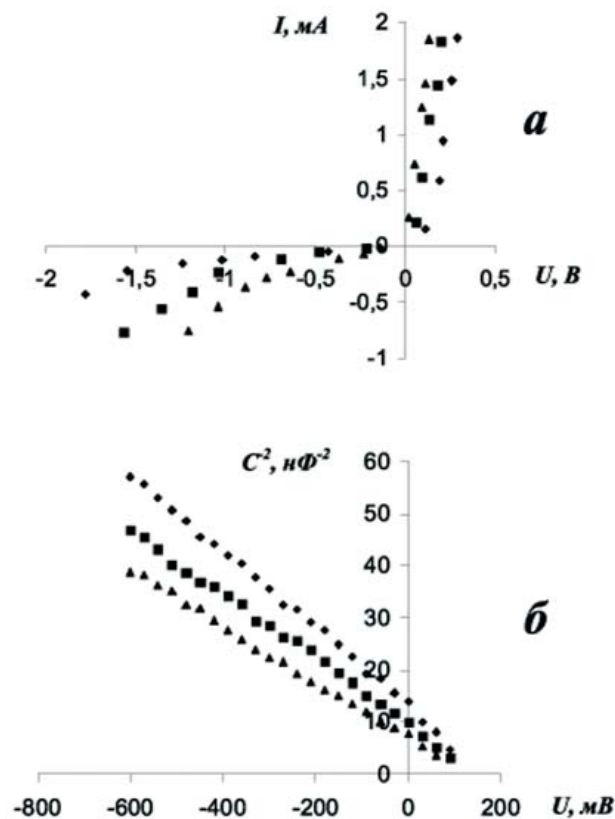


Рис. 3. ВАХ (а) і ВФХ (б) ПБС Au/ δ -шар/ n -Pb_{0,80}Sn_{0,20}Te_{0,81}Se_{0,19}/Al при температурах ~ 110 К (♦), ~ 170 К (■) и ~ 200 К (▲).

- ренційного опору при нульовому зміщенні на активну площу $R_0A = 0,30 \div 1,01$ Ом·см², пікову квантову ефективність $\eta_\lambda = 0,28 \div 0,52$, питому виявну здатність $D_\lambda^* = (0,61 \div 1,93) \times 10^{10}$ см·Гц^{1/2}·Вт⁻¹, коефіцієнт ідеальності $\beta = 1,47 \div 2,12$, струм насичення $I_s = 74 \div 183$ мкА, послідовний опір $r = 0,31 \div 0,98$ Ом, ємність при нульовому зміщенні $C_0 = 261 \div 333$ пФ та величину дифузійного потенціалу при нульовому зміщенні $\phi_{bi}^0 = 0,081 \div 0,122$ В при температурі вимірювання $T_g \sim 170$ К;
- 2) ПБС Pb/ δ -шар/ p -Pb_{1-x}Sn_xTe_{1-y}Se_y/p⁺-Pb_{0,80}Sn_{0,20}Te/Au – $\lambda_p \sim 8 \div 8,2$ мкм, $\lambda_c \sim 8,3 \div 8,5$ мкм, $R_0A = 0,18 \div 0,97$ Ом·см², $\eta_\lambda = 0,28 \div 0,51$, $D_\lambda^* = (0,70 \div 1,83) \times 10^{10}$ см·Гц^{1/2}·Вт⁻¹, $\beta = 1,7 \div 2,8$, $I_s = 94 \div 229$ мкА, $r = 3,5 \div 6,7$ Ом, $C_0 = 221 \div 270$ пФ, $\phi_{bi}^0 = 0,106 \div 0,119$ В при $T_g \sim 170$ К;
 - 3) ПБС Au/ δ -шар/ n -Pb_{1-x}Sn_xTe_{1-y}Se_y(BaF₂)/Pb – $\lambda_p \sim 8,6 \div 12,2$ мкм, $\lambda_c \sim 9,2 \div 12,8$ мкм, $R_0A = 1,70 \div 2,72$ Ом·см², $\eta_\lambda = 0,33 \div 0,49$, $D_\lambda^* = (3,02 \div 4,51) \times 10^{10}$ см·Гц^{1/2}·Вт⁻¹, $C_0 = 2,2 \div 2,4$ нФ при $T_g \sim 80$ К.

На рис. 2 приведена типова спектральна залежність питомої виявної здатності досліджуваних 2х10-елементних лінійок фотовольтаїчних інфрачер-

воних сенсорів з ПБС III-го типу на прикладі діоду Au/ δ -шар/ n -Pb_{0,90}Sn_{0,10}Te_{0,26}Se_{0,74}/Pb, який при $T_e \sim 80$ К, $\lambda_p \sim 12,2$ мкм і $\lambda_c \sim 12,8$ мкм мав $R_0 A = 2,63$ Ом·см², $\eta_i = 0,48$ та $D_{\lambda}^* = 4,41 \times 10^{10}$ см·Гц^{1/2}·Вт⁻¹.

В області напруг зміщення $0,01 < U < 0,33$ В прямі вітки темнових ВАХ одержаних інфрачервоних сенсорів добре апроксимувались залежністю:

$$I = I_s \cdot \exp \left[\frac{q \cdot (U - I \cdot r)}{\beta \cdot k \cdot T} \right] \quad [\text{A}], \quad (1)$$

де β – коефіцієнт ідеальності; I_s – струм насичення; k – стала Больцмана; T – температура вимірювання; r – послідовний опір бар'єрної структури. В даному діапазоні напруг зворотній струм не досягав насичення, а вітки мали вигляд, характерний для “м'якого пробою”.

Вольт-фарадні характеристики інфрачервоних сенсорів для зворотних напруг зміщення $-0,8 < U < 0$ В добре апроксимувались залежністю:

$$C^{-2} = B \cdot \beta \cdot \left[\beta \cdot \left(\varphi_{bi}^0 - \frac{k \cdot T}{q} \right) - U \right] \quad [\Phi^{-2}], \quad (2)$$

де B – коефіцієнт пропорційності; φ_{bi}^0 – величина дифузійного потенціалу при нульовому зміщенні. Так, ПБС Au/ δ -шар/ n -Pb_{1-x}Sn_xTe_{1-y}Se_y/Al мали значення $B = (3,5 \div 4,8) \times 10^{19}$ $\Phi^{-2} \cdot \text{В}^{-1}$ та напруги відсічки $U_j = 0,122 \div 0,211$ В.

На рис. 3 приведені типові темнові ВАХ і ВФХ досліджуваних діодів при температурах ~ 110 К, ~ 170 К і ~ 200 К на прикладі ПБС Au/ δ -шар/ n -Pb_{0,80}Sn_{0,20}Te_{0,81}Se_{0,19}/Al. При збільшенні температури вимірювання від 77 до 200 К її значення коефіцієнту ідеальності β зменшувалось від 1,98 до 1,27. Це свідчить про те, що при низьких температурах загальний струм через діод обумовлений генераційно-рекомбінаційною складовою, а при більш високих температурах додається ще й дифузійна. Відсутність насичення зворотних гілок ВАХ можна пояснити залежністю висоти енергетичного бар'єру для потоку носіїв заряду з металу в напівпровідник від прикладеної напруги внаслідок наявності δ -шару.

Висновки

Таким чином, проведені дослідження електрофізичних та фотоелектричних властивостей сформованих ПБС Au/ δ -шар/ n -Pb_{1-x}Sn_xTe_{1-y}Se_y/Al(Pb)

та Pb/ δ -шар/ p -Pb_{1-x}Sn_xTe_{1-y}Se_y/ p^+ -Pb_{0,80}Sn_{0,20}Te/Au на діелектричних та напівпровідникових підкладках показали, що запропонована лабораторна методика дає можливість одержувати лінійки фотovoltaїчних інфрачервоних сенсорів, які при пікових довжинах хвиль та робочих температурах вимірювання мають значення питомої виявної здатності, величини яких близькі до межі детектування, обмеженої фоновими шумами ($T_{\phi} \sim 300$ К).

Література

1. Piotrowski J. and Rogalski A., High-Operating-Temperature Infrared Photodetectors. – SPIE Press, Bellingham, Washington USA. – 2007. – 240 p.
2. Rogalski A., Infrared detectors: status and trends // Progress in Quantum Electronics. – 2003. – Vol. 27. – P. 59–210.
3. Rogalski A., Ciupa R., PbSnTe photodiodes: theoretical predictions and experimental data // Opto-Electronics Review. – 1997. – Vol. 5, № 1. – P. 21–29.
4. Zogg H., Alchalabi K., Zimin D., Lead chalcogenide on silicon infrared focal plane arrays for thermal imaging // Defence Science Journal. – 2001. – Vol. 51, № 1. – P. 53–65.
5. Zogg H., Arnold M., Zimin D., Alchalabi K., Kellermann K. Lead chalcogenide IR-emitters and detectors on Si-substrates // Moldavian Journal of the Physical Sciences. – 2006. – Vol. 5, № 1. – P. 88–96.
6. Chao I., McCann P.J., Yuan W., O'Rear E.A., Yuan S., Growth and characterization of IV-VI semiconductor heterostructures on (100) BaF₂ // Thin Solid Films. – 1998. – Vol. 323. – P. 126–135.
7. Sachar H.K., Chao I., McCann P.J., Fang X.M., Growth and characterization of PbSe and Pb_{1-x}Sn_xSe on Si(100) // Journal of Applied Physics. – 1999. – Vol. 85, № 10. – P. 7398–7403.
8. Pashaev A.M., Davarashvili O.I., Aliyev V.A., Erukashvili M.I., Zlomanov V.P., Kamushadze T.D., Mirianashvili Sh.M., Crystals of lead chalcogenides and solid solutions on their basis // Georgia Chemical Journal. – 2009. – Vol. 9, № 1. – P. 1–3.
9. Tsarenko O.N., Ryabets S.I., Tkachuk A.I., Properties of the Pb_{1-x}Sn_xTe_{1-y}Se_y epitaxial layers grown from the supersaturated melt-solution on dielectric and semiconductor

- substrates // Functional Materials. – 2005. – Vol. 12, № 3. – P. 526-530.
10. Ткачук А.И., Царенко О.Н., Рябец С.И., Ткачук И.Ю., Ковалёв Ю.Г., Получение поверхностно-барьерных структур на основе четырёхкомпонентных твёрдых растворов А4В6 // журнал «Технология и конструирование в электронной аппаратуре». – 2007. – № 1 (67). – С. 42-44.
 11. Царенко О.М., Ткачук А.І. Особливості формування та властивості діодів Шотткі на основі твердих розчинів сполук А4В6 (огляд)// Наукові записки КДПУ. Сер. фіз.-мат. науки. – 2002. – Вип. 43. – С. 122-138.