

УДК 621.383.526, 621.793, 546.682

ФОТОДІОД ШОТТКІ НА ОСНОВІ $\text{Cr/In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$

А. Ащеулов, доктор технічних наук,

І. Романюк, кандидат технічних наук, заступник директора,
ТДВ «завод «Кварц», м. Чернівці,

Ю. Добровольський, доктор технічних наук, доцент,

С. Дремлюженко, кандидат хімічних наук, старший науковий співробітник,

А. Галочкін, асистент,

Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича

Створено конструкцію і технологію фотодіодів Шотткі на основі монокристалічної підкладки $n\text{-In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$ з бар'єрним шаром із хрому площею 100 mm^2 для використання як робочий еталон за калібрування аналогічних фотодіодів з підвищеною радіаційною стійкістю, чутливих у спектральному діапазоні $(0,5 \div 1,7) \text{ мкм}$. Струмова монохроматична чутливість фотодіода складає $0,33 \text{ A/W}$ на довжині хвилі $1,55 \text{ мкм}$, нелінійність енергетичної характеристики не перевищує 2% у діапазоні від 10^{-3} до $2 \times 10^5 \text{ лк}$.

Established design and technology Schottky photodiodes based on single crystal substrates $n\text{-In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$ with barrier layer of chromium 100 mm^2 . Photodiode recommended for use as a working standard calibration with similar photodiodes with increased radiation resistance, sensitive in the spectral range $(0,5 \div 1,7) \text{ мкм}$. Monochromatic sensitivity photodiode current is $0,33 \text{ A/W}$ at a wavelength of $1,55 \text{ мкм}$. The nonlinearity characteristics of energy does not exceed 2% in the range from 10^{-3} to $2 \times 10^5 \text{ lux}$.

Ключові слова: фотодіод Шотткі, радіаційна стійкість, $\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$, чутливість, нелінійність.

Keywords: Schottky diode, radiation resistance, $\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$, sensitivity, nonlinearity sensitivity, nonlinearity.

Актуальне питання сучасної мікрофотоелектроніки — створення радіаційностійких фотодіодів, чутливих у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах спектра. Такі фотодіоди використовують у пристроях керування механізмами та роботами за умов підвищеної радіації, а саме, у реакторних відсіках атомних силових установок, за нормальних робочих умов та за аварійних. До них, зокрема, належать фотодіоди на основі $\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$ [7]. Калібрування приладів на основі таких фотодіодів вимагає створення спеціалізованого фотодіода з характеристиками, які могли б задовольняти і вимоги за призначенням — достатню чутливість за умов радіаційного впливу і динамічний діапазон, не менший від семи порядків; окрім того, забезпечувати вимоги до робочих еталонів, що використовують для досліджень зазначених первинних перетворювачів.

Вимірювання енергетичних характеристик оптичного випромінювання у діапазоні спектральної

чутливості фотодіодів з $\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$ ($0,5\text{—}1,6$) мкм забезпечують фотодіоди, створені на основі германію (Ge), кремнію (Si), потрійної сполуки InGaAs тощо [1, 2]. Фотодіоди, створені на основі зазначених напівпровідникових матеріалів у цілому виконують необхідні завдання, в тому числі й забезпечення метрологічного супроводу приладів, що створюють на їх основі. Але щодо радіаційної стійкості, то вони суттєво програють фотодіодам на основі кристалів $\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$ [3], які мають чутливість у спектральному діапазоні ($0,5\text{—}1,6$) мкм, причому максимум спектральної характеристики чутливості припадає на діапазон довжин хвиль ($1,4\text{—}1,6$) мкм. Фотодіоди, створені на основі зазначеного матеріалу, практично перекривають спектральні діапазони чутливості фотодіодів на основі кремнію ($0,4\text{—}1,1$) мкм та германію ($0,5\text{—}1,8$) мкм.

Радіаційна стійкість зазначених фотодіодів до α , β і γ — випромінювань [4], зумовлена наявністю

у кристалічній структурі $\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$ електрично нейтральних катіонних вакансій [5].

Вивчення електричних і фотоелектричних параметрів наявних фотодіодів Шотткі на основі $\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$ [6], а також їх радіаційної стійкості [3] засвідчило, що найбільш високу величину струмової монохроматичної чутливості (S_{λ}) у максимумі спектральної характеристики мають фотодіоди Шотткі на основі $\text{ITO}/\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$ і $\text{Au}/\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$ ($S_{\lambda} = (0,48 - 0,76) \text{ А/Вт}$). Найбільш високу радіаційну стійкість мають фотодіоди на основі $\text{Ni}/\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$. Вони зберігають значення S_{λ} за дії дози γ — випромінювання (D) до $8 \cdot 10^7$ бер. Подальше зростання дози γ -випромінювання призводить до зниження чутливості цієї структури внаслідок відшарування бар'єрного шару з нікелю.

Більш надійні з точки зору збереження конструкції та параметрів — фотодіоди Шотткі на основі структури $\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$, бар'єр до якої виконано з хрому (Cr) [7]. Такий фотодіод є чутливим у спектральному діапазоні (0,6 — 1,6) мкм. Його струмова монохроматична чутливість на довжині хвилі 1,55 мкм (S_{λ}) складає 0,43 А/Вт. Темновий струм — не більший за 4 мкА за напруги зміщення 1 В за нормальних кліматичних умов. Зазначені параметри зберігаються у межах похибок їх вимірювання після дії γ — випромінювання дозою до 2×10^8 бер [7].

Зазначені вище параметри фотодіодів є достатніми для оцінки їх загальної якості, але недостатніми для застосування їх у метрологічних вимірювальних системах. Зокрема, для таких фотодіодів суттєва така характеристика: нелінійність енергетичної характеристики у певному динамічному діапазоні. Окрім того, потрібно порівняти параметри нового фотодіода з параметрами наявних, з урахуванням підвищеної стійкості фотодіода на основі $\text{Cr}/\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$ до α , β і γ — випромінень.

Отже, мета цієї статті — висвітлення результатів розроблення та дослідження фотодіода з бар'єром Шотткі на основі $\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$ з бар'єрним шаром із хрому, для його використання як робочий еталон за калібрування аналогічних фотодіодів із підвищеною радіаційною стійкістю.

ТЕХНОЛОГІЯ СТВОРЕННЯ $\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$

Монокристал $\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$ n -типу вирощували модифікованим методом зонної перекристалізації, в якому нівельовано ефект седиментації вихідних матеріалів [8]. Монокристали, отримувані цим методом, більш однорідні за своїми фізичними параметрами, як у поперечному напрямку, так і в поздовжньому [9]. Їх використання дозволяє значно

зменшити величину темного струму фотодіода [10] за використання його у фотодіодному режимі.

Підготування монокристалів $\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$ до формування на їх основі фотодіодних структур здійснювали у такий спосіб:

- розрізання монокристала на підкладинки виконували на струнній різці з подаванням водно-спиртової суспензії абразиву;
- механічне шліфування — вільними абразивами М10, М5;
- механічне полірування — алмазними пастами АСМ із поступовим зменшенням зерна абразиву;
- мінімізування порушеного шару — шляхом хімічного травлення у 8 % розчині бром у метанолі.

Зовнішній вид фотодіода та схематичне зображення його конструкції наведено на рис. 1.

Операція нанесення нанорозмірних напівпрозорих металічних покриттів для формування діода Шотткі потребує як контролю товщини плівки для забезпечення прозорості металевого електрода, так і чистоти процесу та мінімізації дефектності структури для забезпечення низьких зворотних струмів через бар'єр Шотткі. Контроль за товщиною плівки, яка повинна мати товщину $(8 \div 10)$ нм, здійснювався за інтерференційними максимумами проходження світла через плівку в процесі напилення, а також після процесу на спеціальній скляній пластині-супутнику за висотою перепаду скло-металевої плівки на профілометрі (перепад висоти формується за допомогою металевої маски на пластині-супутнику), точність вимірювання товщини профілометром коливається у межах $(0,5 \div 1)$ нм.

Як напівпрозорий металевий шар для створення бар'єру Шотткі застосовано шар хрому (2)

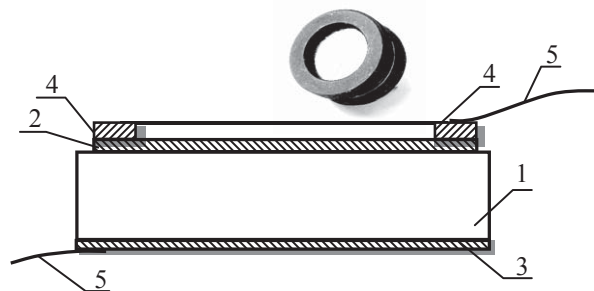


Рис. 1. Структура ФДШ на основі $\text{Cr}/\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$ й її зовнішній вид:

- 1 — підкладинка з $n\text{-In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$, 2 — бар'єрний шар Cr, 3 — омичний контакт з In, 4 — шар нікелю, 5 — електровиводи з міді

Fig. 1. FDSH structure based on $\text{Cr}/\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$, its appearance:

- 1 — lining of $n\text{-In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$, 2 — barrier layer Cr, 3 — ohmic contact with the In, 4 — a layer of nickel, 5 — electric outputs of copper

ефективною площею 100 мм^2 , нанесений методом вакуумного напылення на установці УВН-71ПЗ за температури підкладинки (1) (380—400) К. Товщина бар'єрного шару Cr становила необхідні $(8 \div 10) \text{ нм}$, що забезпечує коефіцієнт пропускання плівки хрому, не менший від 50 %.

Омічний контакт до плівки хрому формувався із нікелю методом термічного напылення. Виділення топології конструкції здійснювалося методами фотолітографії. Оскільки хром є достатньо адгезивним матеріалом, перехідний шар нікелю-хрому, як у [7], непотрібний. Товщина контактного шару нікелю з лицевого боку фотодіода складала близько 1 мкм . Форма контакту кільцева, виконана у такий спосіб, щоби діаметр фоточутливого елемента — ефективна площа, складав 100 мм^2 , що є зручним у процесі розрахунків характеристик, пов'язаних із площею фоточутливого елемента.

Загальний контакт із зворотного боку кристала фотодіода, товщиною близько $0,5 \text{ мкм}$, формувався з індію (3) методом осадження з відповідного розчину. Виводи з міді (5) до кристала фотодіода приєднуються за допомогою імпульсного зварювання.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ФДШ

Фотодіод виготовлено в герметичному металоскляному корпусі (рис. 1). Як вхідне вікно використано диск із кварцу або лейкосапфіру. Такі матеріали вхідного вікна використано у зв'язку з тим, що фотодіод частково має невелику чутливість в ультрафіолетовій області спектра, видимій, а також ближній інфрачервоній.

На рис. 2 представлено відносну спектральну характеристику чутливості створеного фотодіода. Видно, що «червоний» край поглинання фотодіода дещо більший, ніж у фотодіодів на основі германію.

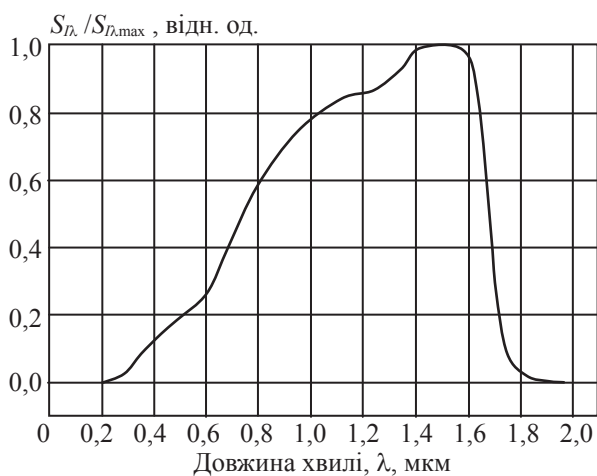


Рис. 2. Відносна спектральна характеристика чутливості фотодіода

Fig. 2. Relative spectral sensitivity characteristics of photodiodes

Величина струмової монохроматичної чутливості у максимумі спектральної характеристики ($1,55 \text{ мкм}$), вимірена згідно з методикою, наведеною у ГОСТ 17772 [11], складає $0,41 \text{ А/Вт}$, що менше, ніж у фотодіодів на основі германію: $(0,7—0,9) \text{ А/Вт}$ [12, 13]. Але фотодіоди на основі германію мають меншу стійкість до іонізуючого випромінювання, ніж фотодіоди на основі індієвих сполук. На довжині хвилі $1,06 \text{ мкм}$ величина струмової монохроматичної чутливості створеного фотодіода складає приблизно $0,33 \text{ А/Вт}$, що відповідає рівню чутливості кращих фотодіодів на основі кремнію для цієї довжини хвилі [14].

Зважаючи на наведене вище, видно, що створений фотодіод здатний замінити собою фотодіоди на основі германію та кремнію, які використовують для калібрування відповідних засобів вимірювальної техніки.

Одна із суттєвих характеристик фотодіода, який використовується для калібрування засобів вимірювальної техніки, призначених для вимірювання характеристик оптичного випромінювання, є лінійність енергетичної характеристики у діапазоні вимірювальної величини, наприклад, освітленості.

Для дослідження динамічного діапазону і нелінійності енергетичної характеристики ($\Delta\delta_E$) створеного фотодіода застосовано метод додаткового світла [15]. Для реалізації цього методу використано спеціалізований освітлювач [16]. Оптична схема за такого методу представляє два канали, в кожному із яких розміщено джерело випромінювання — лампу розжарювання та систему оптичних фільтрів [17]. Основні технічні характеристики вимірювального тракту такі:

- максимальний рівень створюваної освітленості — не менший від $100\,000 \text{ лк}$;

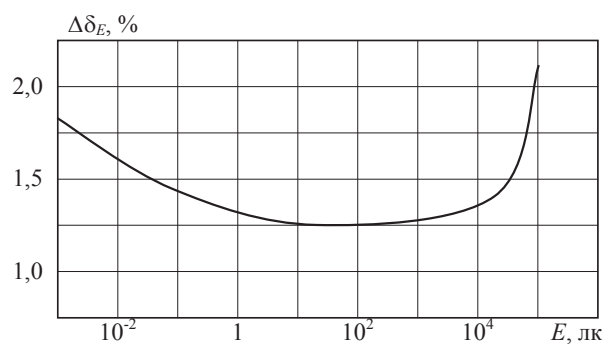


Рис. 3. Залежність нелінійності енергетичної характеристики фотодіода Шоттки на основі $\text{Cr/In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$ від величини освітленості E

Fig. 3. The dependence of the energy characteristics of nonlinearity of photodiode Schottky based on $\text{Cr/In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$ from the value of illumination E

- мінімальний рівень освітленості — не менший від 0,001 лк;
- нестабільність потоку випромінювання — не більша за $\pm 1,0$ %.

Результати досліджень зазначених вище параметрів наведено на рис. 3 (залежність нелінійності енергетичної характеристики від величини освітленості), рис. 4 (енергетична характеристика).

Аналіз даних, наведених на рис. 3 свідчить, що у діапазоні освітленостей від 10^{-3} до 10^5 лк розкид значень нелінійності енергетичної характеристики створеного фотодіода складає від 1 до 2 %, а у діапазоні від 1 до 10^4 лк не перевищує 1,3 %, що є достатньо задовільним результатом. Із рис. 3 та 4 видно, що динамічний діапазон за рівнем 2 % у створеного фотодіода складає вісім порядків, а за рівнем 1 % — чотири порядки. Отже за показником нелінійності енергетичної характеристики та динамічним діапазоном створений фотодіод може бути рекомендовано як первинний перетворювач для прецизійних засобів вимірювання світлових характеристик оптичного середовища, в тому числі еталонних засобів.

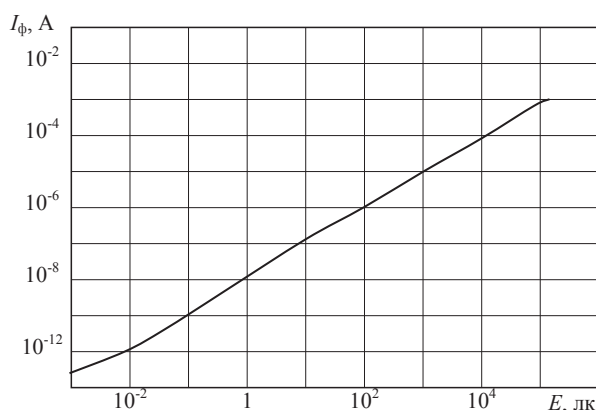


Рис. 4. Енергетична характеристика фотодіода на основі $\text{Cr/In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$

Fig. 4. Energy characteristics of photodiodes based on $\text{Cr/In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$

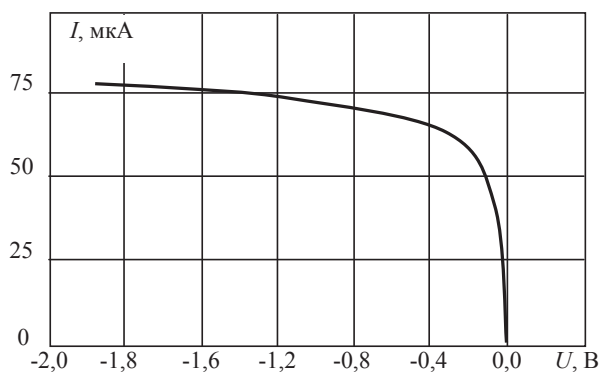


Рис. 5. Вольт-амперна характеристика фотодіода на основі $\text{Cr/In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$

Fig. 5. Current-voltage characteristics of the photodiode from $\text{Cr/In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$

Вивчення темнового струму фотодіода на основі $\text{Cr/In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$ здійснювалося згідно зі стандартною методикою, викладеною в ГОСТ 17772 [11]. Результати дослідження наведено на рис. 5.

Видно, що зворотний (темновий) струм за напруги від 0 до 2 В змінюється від 0 до 75 мкА порівняно з раніше виготовленим фотодіодом [7], у якого зворотний струм змінюється від 1 до 4 мкА. При цьому потрібно враховувати, що збільшення темнового струму в нашому випадку зумовлено збільшенням площі фоточутливого елемента до 100 мм^2 , тоді як у аналога вона складає близько 4 мм^2 . Простий аналіз свідчить, що питомі значення темнового струму за оберненого зміщення мінус 1 В у обох фотодіодів приблизно однакові й складають $0,75 \text{ мкА/мм}^2$.

Для кремнієвих фотодіодів, наприклад, ФД-288, площа фоточутливого елемента якого складає 100 мм^2 , який широко використовується для метрологічних досліджень у світлотехніці, величина темнового струму за зміщення мінус 1 В складає близько 150 нА, що суттєво менше, ніж у створеного фотодіода. Для фотодіода на основі германію питоме значення темнового струму складає $0,5 \text{ мкА/мм}^2$ [12], що практично збігається зі значенням питомого темнового струму створеного фотодіода.

ВИСНОВКИ

1. Створено конструкцію і технологію фотодіодів Шоттки на основі монокристалічної підкладки $n\text{-In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$ з бар'єрним шаром із Cr площею 100 мм^2 для використання як робочий еталон за калібрування аналогічних фотодіодів із підвищеною радіаційною стійкістю.

2. Досліджено метрологічні характеристики фотодіода, зокрема, його спектральну характеристику, величину струмової монохроматичної чутливості ($0,33 \text{ А/Вт}$ на довжині хвилі $1,55 \text{ мкм}$) та нелінійність енергетичної характеристики (менша від 2 %) і динамічний діапазон, який складає не менше 8 порядків (від 10^{-3} до 10^5 лк).

3. Показано, що створений фотодіод може бути використано для дослідження оптичного випромінювання у спектральному діапазоні ($0,5 \div 1,7$) мкм і здатний замінити собою фотодіоди на основі германію та кремнію, які використовуються для калібрування відповідних вимірювальних приладів.

4. З урахуванням радіаційної стійкості створеного фотодіода, він також може бути рекомендований для калібрування оптоелектронних приладів, які працюють у його спектральному діапазоні й повинні зберігати працездатність за умов підвищених рівнів іонізуючого випромінювання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Абдулхаев О.А. Высокочувствительный фотоприемник на основе германиевой двухбарьерной структуры с эффектом смыкания / О.А. Абдулхаев, Д.М. Ёдгорова, А.В. Каримов, Ш.М. Кулиев // ТКЭА (Abdulkhaev O.A., Yodgorova D.M., Karimov A.V., Kuliyeu S.M. Highly sensitive photodetector based on Ge double-barrier punch-through structure // ТКЭА). — 2015. — №4. — С/Р. 24—26.
2. Бараночников М.Л. Приемники и детекторы излучений. Справочник. — М.: ДМК Пресс (Baranochnikov M.L. Receivers and detectors of optical radiation), — 2012. — 640 с/р.
3. Ковальчук М.Л. Фізико-хімічні та фізичні властивості кристалів і гетероструктур на базі радіаційностійких напівпровідників групи $A_2^3B_3^6$ / М.Л. Ковальчук, М.Г. Колісник, О.В. Копач, В.Н. Балазюк, Є.С. Никонюк, М.Д. Раранський, В.М. Склярчук, А.І. Раренко, В.П. Салань, І.В. Докторович // Фізика і хімія твердого тіла (Kovalchuk M.L., Kolesnik M.G., Kopsch O.V., Balazuc V.N., Nykonyuk E.S., Raransky M.D., Sklyarchuk V.M., Rarenko A.I. Salan V.P., Doktorovych I.V. Physico-chemical and physical properties of crystals and heterostructures on the basis of radiation-resistant semiconductors). — 2008. — Т. 9, № 4. — С/Р. 716—722.
4. Грушка Г.Г. Электрические свойства собственного полупроводника $Hg_3In_2Te_6$ / Г.Г. Грушка, З.М. Грушка, Н.П. Гавалешко // УФЖ (Grushka G.G., Grushka Z.M., Gavaleshko N.P. Electrical properties of intrinsic semiconductor $Hg_3In_2Te_6$). — 1985. — 30, №2. — С/Р. 304—307.
5. Диэлектрики и полупроводники в детекторах излучения / Под. ред. Ю.В. Малюкина. — Харьков: Институт монокристаллов (Insulators and semiconductors in the detectors of radiation. Kharkov, Institute of monocrystals). — 2006. — 360 с/р.
6. Brus, V.V. /The effect of CoO impurity and substrate temperature on optical properties of TiO₂ thin films / Brus V.V., Pidkamin L.I., Arkheliyuk A.D. // Proc. SPIE 8338, 83381A, doi:10.1117/12.920902, (2011).
7. Ащеулов А.А. Фотоструктура на основе Cr/In₂Hg₃Te₆ для диода Шоттки / А.А. Ащеулов, А.В. Галочкин, И.С. Романюк, С. Г. Дремлюженко // ТКЭА (Ascheulov A.A., Halochkin A.V., Romanyuk Y.S., Dremlyuzhenko S.G. Photo structure based on Cr/In₂Hg₃Te₆ for Schottky diode). — 2016. — № 2—3. — С/Р. 3—7.
8. Галочкин О.В. Влияние гравитационной седиментации в расплавах многокомпонентных полупроводников на процессы выращивания кристаллов направленной кристаллизацией, зонной плавкой / О.В. Галочкин, В.М. Годованюк, З.И. Захарук, М.Г. Колісник, Г.І. Раренко, І.М. Раренко, М.М. Русковолошин, М.Д. Раранський // Нові технології. Науковий вісник КУЕІТУ (Galochkin O.V., Godovanyuk V.M., Zakharuk Z.I., Kolisnyk M.G., Rarenko A.I., Rarenko I.M., Ruskovoloshyn M.M., Raranskiy M.D. Influence of gravitational sedimentation in semiconductor melt on the crystal growth by direct crystallization, zone melting). — 2010. — №1. — С/Р. 10—15.
9. Пат. 105367 України. Процес отримання монокристалів In₂Hg₃Te₆. Галочкін О.В., Дремлюженко С.Г., Захарук З.І., Колісник М.Г., Ащеулов А.А. (Patent 105 367 Ukraine. The process of obtaining single crystals In₂Hg₃Te₆. Halochkin O.V. Dremlyuzhenko S.G., Zakharuk Z.I., Kolesnik M.G., Ascheulov A.A.). — 2016. — Бюл./Bul. №5.
10. О.В. Галочкін, А.А. Ащеулов, С.Г. Дремлюженко. Координатно-чутливий фотодіод Шоттки на In₂Hg₃Te₆ // Конференція молодих вчених з фізики напівпровідників «Лашкарівські читання 2016», Київ (O.V. Halochkin, A.A. Ascheulov, S.G. Dremlyuzhenko. Jig-sensitive diode Schottky in In₂Hg₃Te₆. // Young scientists conference on semiconductor physics «Lashkaryov Reading 2016»), — 2016, — С/Р. 52.
11. ГОСТ 17772-88. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определения характеристик. М.: Издательство стандартов (ГОСТ 17772-88. Methods of measurement parameters photoelectrical definitions and characteristics. М.: Yzdateltvo standartov), — 1988.
12. Каталог продукції фірми Hamamatsu Photonics. Електронний ресурс. Режим доступу (Products of the company Hamamatsu Photonics. Electronic resource. Access mode): <http://www.sensor.al.ru/IGNIS/indiode.html>.
13. Филачев А.М. Фотоприемники и фотоприемные устройства для приема импульсного излучения в спектральной диапозоне 0,3—11 мкм / А.М. Филачев, В.П. Пономаренко, И.И. Таубкин // Прикладная физика (A.M. Filachev, V.P. Ponomarenko, I.I. Taubkin Photodetectors for receiving pulsed radiation in the spectral range of 0.3 — 11 microns // Applied physics). — 2002. — № 6. — С/Р. 55.
14. Каталог продукції ВАТ ЦКБ «Ритм». Режим доступу (Products OJSC CDB «Rhythm». Access mode): http://www.ckb-rhythm.narod.ru/fdSipin_fd255.html.
15. Гуревич М.М. Фотометрия (теория, методы и приборы). — Ленинград: Энергоатомиздат (Gurevich M.M. Photometry (theory, methods and tools). — Leningrad: Energoatomisdat), — 1983.
16. Бутенко В.К. Установка для вимірювання динамічного діапазону фотоприймачів / В.К.Бутенко, В.М.Годованюк, І.В. Докторович // Науковий вісник ЧНУ. Вип. 112: Фізика. Електроніка. — Чернівці: ЧНУ (Butenko V.K. Godovanyuk V.M. Doktorovych I.V. Device for measuring the dynamic range of photodetectors // Scientific Bulletin of Chernivtsi University), — 2001. — С/Р. 67—70.
17. Шабашкевич Б.Г. Метрологічний комплекс для перевірки і градування оптоелектронних приладів у видимому діапазоні спектру / Б.Г. Шабашкевич, Ю.Г. Добровольський, В.Г. Юр'єв // Метрологія та прилади (B.H. Shabashkevych, Yu.H. Dobrovolsky, V.H. Yur'yev. Metrology system for testing and calibration of optoelectronic devices in the visible range of the spectrum // Metrology and instruments). — № 3. — 2015. — С/Р. 18—23. ■

Отримано / received: 08.02.2017.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., В.Ю. Єроховим (Україна).
D. Sc. (Techn.) V.Yu. Yerokhov, Ukraine, recommended this article to be published.