

А. В. ФЕДОРЕНКО

Україна, м. Київ, Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України
E-mail: aartemaa@gmail.com

СПЕКТРАЛЬНА ФОТОЧУТЛИВІСТЬ ДИФУЗІЙНИХ Ge-p-i-n-ФОТОДІОДІВ

Описано процес виготовлення дифузійним методом швидкодіючих Ge-p-i-n-фотодіодів для лазерного далекоміра з максимумом фоточутливості на довжині хвилі 1,54 мкм. В результаті розрахунку отримано теоретичну криву їхньої спектральної фоточутливості, яка достатньо близько збігається з даними вимірів. Показано можливість врахування більшості конструкційних та технологічних особливостей фотодіодів при проведенні теоретичного моделювання, що дозволяє значно вдосконалити процес їхнього виготовлення. Таким чином, обрана методика моделювання дозволяє більш точно прогнозувати та оптимізувати параметри фотодіодів для конкретної практичної задачі.

Ключові слова: Ge, p-i-n-фотодіод, спектральна фоточутливість, імпульсний лазерний далекомір, теоретичне моделювання.

Лазерні далекоміри широко використовуються для вирішення задач вимірювання відстані в геодезії, будівництві, багатьох технічних галузях цивільного та військового призначення, а також ракетно-космічній техніці [1—6]. В оптичному каналі імпульсних лазерних далекомірів (ЛД) використовують швидкодіючі p-i-n- або лавинні фотодіоди (ЛФД), виготовлені на основі Si, Ge або InGaAs залежно від робочої довжини хвилі λ_0 далекоміра [7—10]. Враховуючи необхідність визначення значних відстаней до об'єктів (понад 5 км) у військових далекомірах використовують, як правило, потужні ЛД з $\lambda_0 = 1,064$ мкм або $\lambda_0 = 1,54$ мкм, що обумовлено можливістю створення активних середовищ лазерів [10] для роботи у вікнах прозорості атмосфери. При цьому, ЛД з $\lambda_0 = 1,54$ мкм мають перевагу з точки зору безпечності зору оператора у порівнянні з ЛД з $\lambda_0 = 1,064$ мкм, вони відповідають вимогам до озброєння за стандартами НАТО. У лазерних далекомірах передача оптичного сигналу відбувається крізь атмосферу на відміну від волоконно-оптичних ліній зв'язку, де також використовуються аналогічні швидкодіючі фотодіоди. А тому у військових далекомірах для зменшення впливу фонового випромінювання та інших спеціальних перешкод, наприклад «осліплення» фотоприймального пристрою стороннім потужним лазерним імпульсом, вводять додаткові елементи: оптичні фільтри, діафрагми, бленди та інше [11—13], але в літературі відсутні відомості про вплив вказаних елементів на робочі параметри Ge-p-i-n-фотодіодів або ЛФД. У [14—16] досліджувалась стійкість фотоприймального пристрою лазерного далекоміра з $\lambda_0 = 1,54$ мкм, побудованого на основі германієвого ЛФД, до «осліплюючого» імпульсного потужного лазерного випромінювання з $\lambda_0 = 1,064$ мкм і $\tau_0 = 4$ нс. Встановлено, що граничне

значення потужності „осліплюючого“ лазерного випромінювання для Ge-ЛФД становить $1 \cdot 10^8$ Вт/см², тоді як у ЛФД на основі сполук A³B⁵ (наприклад, InGaAs) це значення майже на два порядки менше, що однозначно свідчить про перевагу використання германієвих фотоприймачів у військових ЛД. Крім того, у [14] показано, що Ge-ЛФД з більш глибоким заляганням p-n-переходу від опромінюваної поверхні (≈ 6 мкм) проявляють в рази більшу стійкість, ніж з глибиною залягання 2 мкм, що пояснюється особливістю генерації лазерно-індукованих дефектів в активній області Ge-ЛФД. Логічно допустити, що в Ge-p-i-n-фотодіодах будуть спостерігатись аналогічні встановленим авторами [14—16] закономірності зміни темного струму і шуму при їхньому „осліпленні“ імпульсним лазерним випромінюванням з $\lambda_0 = 1,064$ мкм. Зазначимо, що у [14—16] не повідомляється про спектральну залежність ампер-ватної чутливості Ge-ЛФД з меншим (2 мкм) і більш глибоким (6 мкм) p-n-переходом та її трансформацію під дією «осліплюючого» випромінювання.

Метою даної роботи є з'ясування можливості прогнозування ампер-ватної чутливості Ge-p-i-n-фотодіодів залежно від параметрів їхньої активної області на основі існуючих теоретичних моделей та порівняння результатів розрахунку з експериментом.

Виготовлення зразків Ge-p-i-n-фотодіодів

Відомо, що у кремнії пасивуючу функцію успішно виконує власний оксид SiO₂, а захисну, як правило, — діалектичні плівки Si₃N₄ [6, 9, 17]. В Ge власний оксид GeO₂ нестабільний, тому для пасивації активної області Ge-фотодіодів використовуються плівки SiO₂, GeS, Si₃N₄ та їхні комбінації [7, 18, 19]. Враховуючи факт ідеального узгодження параметрів

кристалічних решіток Ge і кубічного ZnSe, а також задовільний збіг їхніх коефіцієнтів термічного розширення [20, с. 72], у [21, 22] досліджувалась можливість використання полікристалічних плівок ZnSe кубічної модифікації як стабільних пасивуючих і захисних покриттів активної області Ge-*p-i-n*-фотодіодів. Трирічні випробування виявили відсутність надлишкових шунтуючих струмів, обумовлених поверхневою провідністю гетерогежі ZnSe/Ge.

Ge-*p-n*-переходи виготовлялись методом дифузії акцепторних домішок Zn та In в підкладки Ge *n*-типу провідності з питомим опором $\rho = 15 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ($T = 300 \text{ К}$). Поверхня підкладок кристалографічної орієнтації (100) оброблялась за стандартною процедурою [23, 24]:

1) двостороннє абразивне шліфування і полірування поверхонь із поступовим зменшенням зернистості абразиву;

2) травлювання механічно порушеного шару ($\approx 70 \text{ мкм}$) методом хіміко-динамічного полірування підкладки з обох сторін з використанням поліруючого травильного розчину, виготовленого на основі СР-4А;

3) знежирення і очищення поверхні підкладок від залишків хімічних реактивів у киплячому ізопропиловому спирті та у дистильованій воді;

4) просушування в атмосфері аргону.

Така підготовка поверхні підкладок Ge, що вибірково контролювалася вимірюванням півширини кривих коливання рентгенівського дифракційного відбиття, забезпечувала відсутність на них порушеного шару. Відібрані підкладки Ge товщиною 600 мкм разом з дифузантом, в ролі якого використовувався сплав In-Zn складом 50:50 об. %, завантажувались в різні місця кварцової ампули: внизу розташовувався дифузант, а на відстані 5—6 см від нього — група з 3—5 підкладок Ge розміром $9 \times 9 \text{ мм}$. Ампула вакуумувалась до остаточного вакууму $5 \cdot 10^{-5} \text{ мм рт. ст.}$ і завантажувалась у теплове поле вертикально розташованої дифузійної печі, яку попередньо виводили на заданий температурний режим. У тепловій зоні джерела дифузії температура становила $650 \pm 0,5^\circ\text{C}$, в зоні підкладок — $700 \pm 0,5^\circ\text{C}$, дифузія проводилась впродовж 7 год. Після цього ампула вільно охолоджувалась на повітрі.

Глибина залягання *p-n*-переходу визначалось по одному із групи зразків методом термозонда при пошаровому травлюванні *p*-області. Для вищезазначених технологічних режимів дифузії вона становила $3 \pm 0,2 \text{ мкм}$. Зміна полярності термо-ерс свідчила про зміну типу провідності, що реєструвалось оптичним способом за допомогою інтерференційного мікроскопа МП-4.

На відібраних структурах з *p-n*-переходом визначалась робоча сторона, яка захищалась хімічно стійким лаком (ХСЛ), а протилежна сторона разом з боковими гранями травлювалась поліруючим розчином СР-4А на глибину 10 мкм. Після очищення робочої сторони від ХСЛ та залишків хімічного трав-

лення вона додатково підтравлювалась на глибину 0,1 мкм у киплячому розчині перекису водню для зняття оксидів, які формувались на поверхні підкладки Ge у процесі дифузії.

На робочу поверхню структури термовакуумним способом наносились контактні площадки діаметром 0,4 мм у вигляді тонких (1—2 мкм) плівок сплаву Sn+3%In, а на зворотну сторону — суцільну плівку такої ж товщини зі сплаву Sn+3%Sb. Для формування якісних омичних контактів структуру з контактними площадками піддавали термообробці в атмосфері чистого водню у вакуумній установці при температурі 400°C упродовж 10 хв. Поверхня площею $1,2 \times 1,2 \text{ мм}$ навколо контактних площадок на робочій стороні *p*-області захищалась ХСЛ. Термообробка контактів призвела до формування сильно легованих підконтактних областей *p*⁺- та *n*⁺-типу в *p*- та *n*-області переходу відповідно. Приповерхневий дифузійний *p*⁺-шар переходу товщиною 0,1 мкм мав ефективну концентрацію дірок $p^+ = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, обумовлену розчиненням Zn в Ge при температурі дифузії 800°C [25, с. 96].

Мезаструктурні *p-n*-переходи виготовлялись травлюванням незахищеної області глибиною 5 мкм у поліруючому розчині СР-4А. Мезаструктура пасивувалась і захищалась тонкою (1,5 мкм) плівкою полікристалічного ZnSe, яка наносилася термовакуумним способом на робочу сторону структури при температурі $350\text{—}370^\circ\text{C}$ (температура випаровування ZnSe становить 850°C). Пасивовану структуру з групою мезаструктурних *p-n*-переходів розрізали методом струнної алмазної різки на окремі чіпи з розміром бази $3 \times 3 \text{ мм}$, які монтувались на ніжку корпусу фотодіодів.

Для дослідження впливу на спектральну залежність ампер-ватної чутливості дифузійних Ge-фотодіодів було розроблено і виготовлено спеціальні корпуси, конструкція яких захищена патентом України на корисну модель [26], з просвітленням в спектральному діапазоні $\lambda = 1,4\text{—}1,6 \text{ мкм}$ кремнієвим фільтром.

На рис. 1 наведено конструкцію мезаструктурного чутливого елемента дифузійного Ge *p-n*-переходу, яка демонструє розміщення його конструктивних елементів.

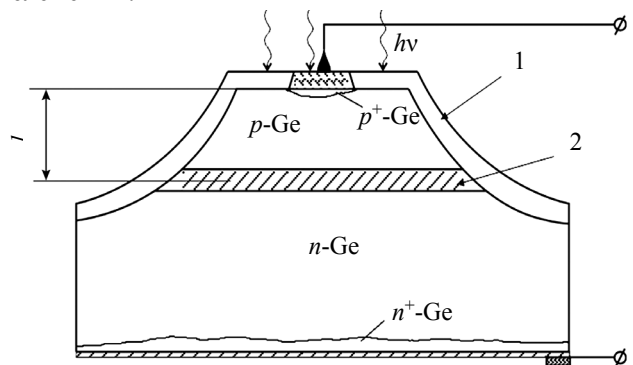


Рис. 1. Конструкція мезаструктурного Ge-фотодіода з глибиною залягання *p-n*-переходу l_{p-n} : 1 — ZnSe; 2 — анодний оксид

Модель для розрахунку ампер-ватної чутливості Ge-фотодіодів

В роботах [17, с. 59; 21] використовується формула, за якою можливо оцінити монохроматичну ампер-ватну чутливість фотодіода в абсолютних одиницях (у А/Вт):

$$S_i = (1 - R)TQ\alpha_{p-n} \frac{\lambda}{1,24}, \quad (1)$$

де R — коефіцієнт відбиття;

T — коефіцієнт пропускання оптичного фільтру;

Q — внутрішній квантовий вихід фотоелектру в активній області фотодіода;

α_{p-n} — коефіцієнт збирання нерівноважних носіїв заряду (ННЗ), генерованих випромінюванням в активній області фотодіода;

λ — довжина хвилі (в мкм), на якій визначається S_i .

Зазначимо, що збирання ННЗ в дифузійних Ge-фотодіодах здійснюється з трьох областей: квазінейтральних p -, n -областей та області просторового заряду (ОПЗ), тому

$$\alpha_{p-n} = \alpha_p + \alpha_{\text{ОПЗ}} + \alpha_n. \quad (2)$$

Для оцінки цих коефіцієнтів у [23] запропоновано наступні вирази:

$$\alpha_p = \frac{kL_n}{k^2L_n^2 - 1} \left[\frac{SL_n + kL_n - X \exp(-kl)}{D_n} - kL_n \exp(-kl) \right]; \quad (3)$$

$$X = \frac{SL_n}{D_n} \operatorname{ch} \frac{l}{L_n} + \operatorname{sh} \frac{l}{L_n}; \quad (3')$$

$$\alpha_{\text{ОПЗ}} = \exp(-kl) [1 - \exp(-kW)]; \quad (4)$$

$$\alpha_n = \frac{kL_p}{kL_p + 1} \exp[-k(l + W)], \quad (5)$$

де k — коефіцієнт міжзонного поглинання в Ge;

S — швидкість поверхневої рекомбінації в p -області;

L_n, L_p — значення дифузійної довжини нерівноважних електронів та дірок;

W_0 — коефіцієнт ширини ОПЗ;

D_n — коефіцієнт дифузії електронів.

Як видно з аналізу формул (1)—(5), теоретична модель розрахунку ампер-ватної чутливості фотодіода дає можливість досліджувати вплив кожної з областей p - n -переходу на її загальне значення та прогнозувати конструкцію активної області залежно від цільового призначення.

Результати та їхнє обговорення

Вольт-амперні характеристики (ВАХ) вимірювались при постійному струмі в діапазоні значень струму $1 \cdot 10^{-9}$ — $1 \cdot 10^{-3}$ А. Дослідження вольт-фарадних

характеристик (ВФХ) здійснювалось за допомогою приладу Е7-14 на частоті $f = 10$ кГц при кімнатній температурі. (При $f = 1$ МГц ємність зразків не залежить від напруги зміщення в діапазоні прикладеної напруги $U = \pm 2$ В і визначається геометричними розмірами високоомної бази.) Спектральні залежності ампер-ватної чутливості вимірювались за кімнатної температури на установці, змонтованій на базі монохроматора SPM-2 з LiF призмою, в діапазоні довжини хвиль 0,5—2,0 мкм з синхронним детектуванням сигналу на частоті 670 Гц. Як джерело випромінювання використовувалась кварцево-галогенна лампа потужністю 250 Вт. Рівномірність потоку випромінювання на вхідній щілині монохроматора забезпечувалась об'єктивом з кварцовими лінзами. Потужність випромінювання, що потрапляло після вихідної щілини монохроматора на всю активну поверхню досліджуваних на частоті 10 кГц зразків, вимірювалось піроелектричним приймачем, виготовленим в Інституті фізики НАН України і атестованим на моделі абсолютно чорного тіла. Реєстрація сигналу з освітлених чипів Ge-фотодіодів відбувалась у фотогальванічному режимі струму короткого замикання на навантажувальному опорі $R_n = 1$ кОм, який на два порядки менший за темновий диференційний опір фотодіодів при $t = 300$ К. В [21] показано, що напруга зворотного зміщення $U = -10$ В не призводить до суттєвої зміни ампер-ватної чутливості у цих же зразках, тому фотодіодний режим їхнього включення в цій роботі не досліджувався. В інтервалі температури 227—316 К експериментальні результати при прямих напругах зміщення задовільно апроксимуються виразом

$$I = I_0 \left[\exp \frac{e(U - IR_s)}{\beta kt} - 1 \right], \quad (6)$$

де I_0 — струм насичення;

R_s — послідовний опір;

β — коефіцієнт неідеальності.

Наприклад, для кімнатної температури ($t = 293$ К) $I_0 = 2,6 \cdot 10^{-7}$ А, $R_s = 1,2 \cdot 10^3$ Ом, $\beta = 1,3$, а шунтуючий опір $R_{\text{ш}} = 1,3 \cdot 10^6$ Ом. При зворотному зміщенні величиною $U_{\text{зв}} = -20$ В темновий струм не перевищує $2 \cdot 10^{-6}$ А, що свідчить про достатньо високу якість експериментальних Ge- p - n -переходів з їхніми електричними властивостями.

Аналіз показав, що експериментальні дані вимірювання ВФХ на частоті 10 кГц лінеаризуються в координатах C^{-3} — U , де C — бар'єрна ємність переходу, а U — напруга зворотного зміщення, що однозначно свідчить про плавний (лінійний) розподіл легуючої домішки Zn на межі p - n -переходів.

За нахилом графіка залежності $C^{-3} = f(U)$ оцінено градієнт концентрації легуючої (дифузійної) домішки Zn на лінійній ділянці її профілю легування, який становив $a = 4,4 \cdot 10^{19}$ см⁻⁴, а довжина ОПЗ пе-

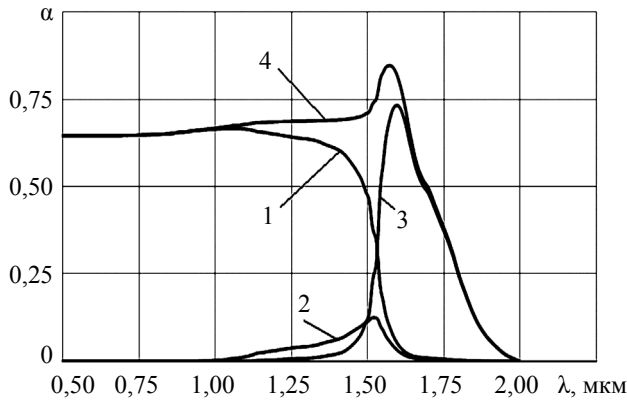


Рис. 2. Спектральний розподіл коефіцієнтів збирання ННЗ з активних областей дифузійного Ge-фотодіода з параметрами П2 (див. таблицю):

1 — квазінейтральної *p*-області; 2 — області просторового заряду; 3 — квазінейтральної *n*-області; 4 — сумарний

реходів при нульовій напрузі зміщення дорівнювала $W_0 = 3$ мкм при $t = 293$ К.

Значення фото-ерс насичення Ge-*p-n*-переходів фотодіодів при їх освітленні інтегральним концентрованим випромінюванням від кварцево-галогенної лампи досягало значень $U_n = 0,3 \pm 0,02$ В ($t = 293$ К). Також визначались значення контактної різниці потенціалів в дифузійних *p-i-n*-переходах.

Для проведення розрахунків коефіцієнт відбиття для діапазону 1,5—1,9 мкм було взято з [27], а коефіцієнт власного поглинання — з [28]. На рис. 2 представлено типовий спектральний розподіл коефіцієнтів збирання, отриманих за формулами (2) — (5) для параметрів П2, наведених у таблиці.

Результати розрахунку спектральної ампер-ватної чутливості дифузійного Ge-*p-i-n*-фотодіода без кремнієвого оптичного фільтра для трьох варіантів параметрів активної області, а також експериментальні дані зображено на рис. 3. Аналіз цих даних показує, що найбільше з експериментальними даними збігаються результати розрахунку ампер-ватної чутливості для варіанту П3 (крива 2), причому достатньо задовільний збіг спостерігається в спектральному діапазоні довжини хвиль 0,85—1,8 мкм. Більш суттєві розходження при $\lambda < 0,85$ мкм можуть бути пов'язані зі

Параметри активної області Ge-*p-n*-переходу для трьох варіантів розрахунків

Позначення варіанту	Параметри активної області					
	L_n , мкм	D_n , см ² /с	S_p , см/с	l , мкм	W , мкм	L_p , мкм
П1	7,2	52	$1 \cdot 10^3$	3	3	230
П2	3,0					
П3*	2,3					

*У цьому випадку для розрахунків коефіцієнт збирання з ОПЗ, отриманий за формулою (4), зменшувався вдвічі і дорівнював $0,5\alpha_{\text{ОПЗ}}$, що ближче до реальних умов.

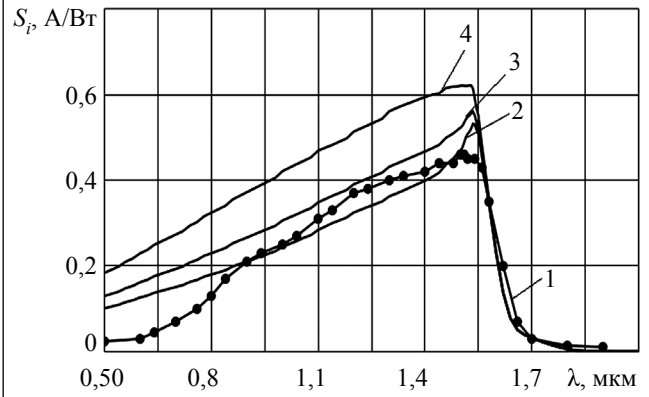


Рис. 3. Спектральний розподіл ампер-ватної чутливості дифузійного Ge-фотодіода, отриманий експериментально (1) та в результаті розрахунку для трьох варіантів параметрів активної області (див. таблицю):

2 — П3; 3 — П2; 4 — П1

спрощеною моделлю розрахунку. Згідно з теоретичною моделлю вважається, що значення L_n нерівноважних носіїв заряду в квазінейтральній *p*-області переходу є сталою величиною, значення якої приведено в таблиці. Але реальна *p*-область формується дифузійним профілем легуючих акцепторних домішок Zn та In, що обумовлює зміну разом із профілем легування і параметрів D_n та τ_n (час життя нерівноважних електронів), які призводять до зміни L_n , оскільки $L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$.

Зазначимо, що для прогнозування ампер-ватної чутливості Ge-*p-i-n*-фотодіодів залежно від конструкції та параметрів чутливої області важливим є саме спектральний діапазон 1,0—1,7 мкм, а також положення максимуму фоточутливості та його значення в максимумі. Як видно з рис. 3, положення максимумів на всіх кривих збігається задовільно і припадає на $\lambda \approx 1,54$ мкм. При цьому власне максимальне значення ампер-ватної чутливості, отримане експериментально, відрізняється не більше ніж у 1,3 рази від отриманого теоретично при розрахуванні за варіантом П3, тобто із зменшеним коефіцієнтом збирання з ОПЗ (розрахункові більші).

Таким чином, представлені на рис. 3 дані свідчать про доцільність проведення розрахунків із зменшеним коефіцієнтом збирання з ОПЗ, що дозволяє врахувати вплив додаткових факторів при виготовленні зразків.

Достатньо задовільний збіг експериментальних даних з розрахунковими на краю поглинання ($\lambda > 1,56$ мкм) свідчить як про коректність даних (коефіцієнтів поглинання в Ge), так і про адитивність параметрів L_p в квазінейтральній *n*-області дифузійного *p-n*-переходу.

Вплив просвітленого кремнієвого оптичного фільтра (див. криву пропускання на рис. 4) на спектральний розподіл ампер-ватної чутливості дифузійного Ge-фотодіода наведено на рис. 5. У цьому випадку з експериментальними даними найкраще збі-

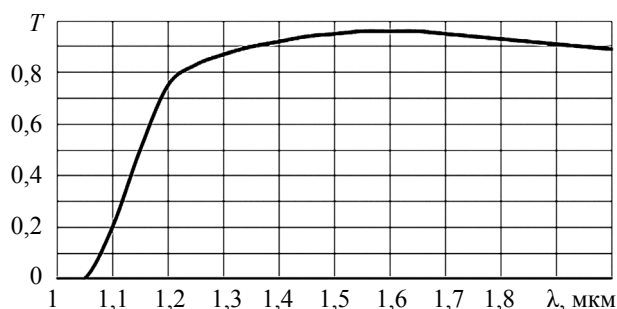


Рис. 4. Спектральний розподіл коефіцієнта пропускання кремнієвого оптичного фільтра, просвітленого в діапазоні $\lambda = 1,4\text{—}1,6$ мкм

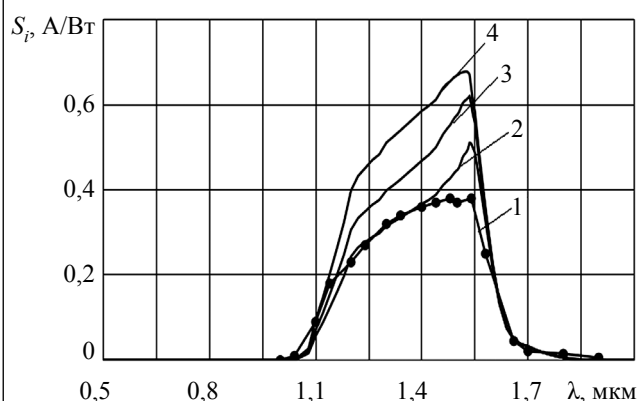


Рис. 5. Спектральний розподіл ампер-ватної чутливості дифузійного Ge-фотодіода з кремнієвим фільтром, отриманий експериментально (1) та в результаті розрахунку для трьох варіантів параметрів активної області, наведених у таблиці:

2 — ПЗ; 3 — П2; 4 — П1

гаються результати розрахунків, отриманих для параметрів активної області ПЗ, що дозволяє прогнозувати ампер-ватну чутливість Ge-*p-i-n*-фотодіода з кремнієвим оптичним фільтром. Зауважимо, що для $\lambda = 1,064$ мкм застосування у конструкції корпусу фотодіода кремнієвого оптичного фільтра зменшує ампер-ватну фоточутливість майже на порядок. Тобто навіть після дії „осліплюючого“ лазерного опромінення з $\lambda = 1,064$ мкм військові лазерні далекоміри з такими фотодіодами зможуть зберегти свою працездатність при потужності опромінення на порядок більшій, ніж встановлено в [14—16]. Задовільний збіг положення максимуму фоточутливості розрахункових та експериментальних даних ($\lambda = 1,54\text{—}1,55$ мкм) свідчить про коректність використання літературних даних щодо коефіцієнту міжзонного поглинання в Ge.

Висновки

Таким чином, в результаті проведених досліджень можна зробити висновок, що на базі існуючих теоретичних моделей можна коректно прогнозувати спектральну фоточутливість Ge-*p-i-n*-фотодіоду. В проведеному порівнянні експериментально вимірених значень ампер-ватної чутливості виготовлених зразків та теоретичного розрахунку різниця для макси-

муму чутливості не перевищує 0,2 А/Вт, а уточнення характеристик надає можливість теоретично моделювати параметри виготовленого фотодіоду.

Отримані результати свідчать про те, що при виготовленні фотодіодів для розрахунку спектральної фоточутливості доцільно використовувати наведену теоретичну модель: підбір параметрів, які вносять найбільший вклад в остаточну спектральну фоточутливість, дозволяє отримати оптимальне її значення для конкретного спектрального діапазону. Крім цього, порівняння спектральної фоточутливості створених зразків з теоретично розрахованою дозволить оцінити якість їхнього виготовлення, встановити відхилення в структурі фотодіоду в разі їх наявності та скорегувати технологічний процес виготовлення.

Також результати вказують на те, що при теоретичному моделюванні можливо враховувати окремі оптичні елементи, такі як кремнієвий фільтр, що дає змогу більш точно розраховувати їхній вплив на створюваний фотоприймач в складі цілого приладу. Це є корисним при розробці конструкції чутливої області Ge-фотодіодів різного цільового призначення.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Molebny V., McManamon P., Steinvall o. et al. Laser radar: historical prospective — from the East to the West. *Optical Engineering*, 2016, no. 56(3), pp. 031220, <https://doi.org/10.1117/1.OE.56.3.031220>
2. Бокшанский В.Б., Бондаренко Д.А., Вязовых М.В. и др. *Лазерные приборы и методы измерения дальности*, Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012.
3. Фираго А.В., Петрович И.П., Буйко А.С., Шумак Д.В. *Увеличение дальности действия лазерных дальномеров с безопасным для глаз излучением*. Минск, Изд. центр БГУ, 2010.
4. Белов И.Ю. *Физические основы оптической дальнометрии*, Казань, КГУ, 2009.
5. Федоренко А.В., Качур Н.В., Маслов В.П., Арустамян А.Е. Тенденції розвитку приладів лазерної далекометрії. *Матер. V Всеукр. наук.-практ. конф. Наукові дослідження: перспективи інновацій у суспільстві і розвитку технологій*, Україна, Харків, 2017, с. 86–90.
6. Федоренко А.В., Мельник В.К. Шляхи підвищення чутливості фотоприймального каналу імпульсного лазерного далекоміра. *Матер. першої міжнар. наук.-практ. конф. «Елементи, прилади та системи електронної техніки (ЕПСЕТ-18)»*, Україна, Запоріжжя, ЗДІА, 2018, с. 68–69.
7. Большаков Т.Д., Самохвалов А.К., Уварова С.Д. и др. Способ изготовления и параметры Ge *p-i-n*-фотодиодов. *Прикладная физика*, 2012, № 4, с. 115–119.
8. Рюхтин В.В., Добровольский Ю.Г. Особенности разработки термостабилизированных германиевых фотодиодов. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2004, № 6, с. 45–48.
9. Капассо Ф., Пирсолл Т., Поллак М. и др. *Техника оптической связи*. Фотоприемники, Москва, Мир, 1988.
10. Глушенко А.Р., Гордиенко В.И., Бурковский А.А. и др. *Лазерные системы танковых прицелов*, Черкасы, Маклаут, 2009.
11. Янушенков Ю.Г., Луканцев В.Н., Колосов М.П. *Методы борьбы с помехами в оптико-электронных приборах*, Москва, Радио и связь, 1981.
12. Рогальский А. *Инфракрасные детекторы*, Новосибирск, Наука, 2003.
13. Хинрикус Х.В. *Шумы в лазерных информационных системах*, Москва, Радио и связь, 1987.

14. Зверев Г.М., Землянов М.М., Короннов А.А. Действие мощного импульса лазерного излучения на германиевый лавинный фотодиод. *Прикладная физика*, 2015, № 2, с. 79–83.

15. Короннов А.А., Зверев Г.М., М.М. Землянов М.М. и др. Исследование характеристик германиевого лавинного фотодиода, подвергнутого мощному лазерному воздействию. *Прикладная физика*, 2015, № 4, с. 54–58.

16. Короннов А.А., Сафутин А.Е., Землянов М.М., Зверев Г.М. Повышение стойкости фотоприемных устройств на базе германиевого лавинного фотодиода к воздействию мощного лазерного излучения. *Прикладная физика*, 2015, № 6, с. 65–69.

17. Анисимова И.Д., Викулин И.М., Зайтов Ф.А. и др. *Полупроводниковые фотоприемники: ультрафиолетовый, видимый и ближний инфракрасный диапазон спектра*, Москва, Радио и связь, 1984.

18. Ржанов А.В. (ред.) *Свойства структур металл – диэлектрик – полупроводник*, Москва, Наука, 1976.

19. Зи С. *Физика полупроводниковых приборов. Т.1*. Москва, Мир, 1984.

20. Шарма Б.Л., Пурохит Р.К. *Полупроводниковые гетеропереходы*. Москва, Сов. радио, 1979.

21. Маслов В.П., Сукач А.В., Тетьоркин В.В. та ін. Особливості виготовлення, електричні та фотоелектричні властивості дифу-

зійних Ge p-i-n-фотодіодів. *Оптоелектроника и полупроводниковая техника*. 2018, вип. 53, с. 188–198.

22. Тетьоркін В.В. та ін. *Германієвий фотоперетворювач та спосіб його виготовлення*. Пат. № 120653 України, 2020, бюл. № 1.

23. Луфт Б.Д., Перевошиков В.А., Возмилова Л.Н. и др. *Физико-химические методы обработки поверхности полупроводников*. Москва, Радио и связь, 1982.

24. Перевошиков В.А., Скупов В.Д. *Особенности абразивной и химической обработки поверхности полупроводников*. Нижний Новгород, ННГУ, 1992.

25. Баранский П.И., Клочков В.П., Потыкачев И.В. *Полупроводниковая электроника. Свойства материалов. Справочник*. Киев, Наук. думка, 1975.

26. Маслов В.П. та ін. *Дистанційний датчик температури*. Пат. на корисну модель № 125612 України, 2018, бюл. № 9.

27. Amotchkina T., Trubetskov M., Hahner D., Pervak V. Characterization of e-beam evaporated Ge, YbF₃, ZnS, and LaF₃ thin films for laser-oriented coatings. *Appl. Opt.*, 2020, vol. 59, iss. 5, pp. A40–A47, <https://doi.org/10.1364/AO.59.000A40>

28. Palik E. D. *Handbook of Optical Constants of Solids*. NY, Academic Press, 1985.

Дата надходження рукопису до редакції 04.06 2020 р.

DOI: 10.15222/TKEA2020.3-4.17

UDC 621.315.592

A. V. FEDORENKO

Ukraine, Kyiv, V. E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics NAS of Ukraine

E-mail: aartemaa@gmail.com

SPECTRAL PHOTOSENSITIVITY OF DIFFUSED Ge p-i-n-PHOTODIODES

Laser rangefinders are widely used to measure distances for various civil and military purposes, as well as in rocket and space technology. The optical channel of such rangefinders uses high-speed p-i-n, or avalanche, photodiodes based on Si, Ge or InGaAs depending on the operating wavelength of the rangefinder in question.

The paper describes a manufacturing process for high-speed Ge-p-i-n photodiodes for laser rangefinders using the diffusion method. The passivation layer is made of ZnSe, which is a new solution for this type of photodiodes. The existing theoretical models are used to study the spectral ampere-watt sensitivity of the diodes at various values of the active region parameters, and the simulation results reliability is evaluated by the respective measurements. It is shown that the obtained theoretical dependence well agrees with the measurement data.

Moreover, the authors for the first time study the spectral photosensitivity of the Ge-p-i-n photodiode with a coated silicon filter covering the range $\lambda = 1.4\text{--}1.6\ \mu\text{m}$. The spectral sensitivity range for the diodes is determined to be $\lambda = 1.1\text{--}1.7\ \mu\text{m}$. The maximum photosensitivity of 0.42 A/W is achieved at a wavelength of $\lambda = 1.54\ \mu\text{m}$. The authors argue that Ge-p-i-n photodiodes with a silicon filter are resistant to the “blinding” laser radiation with $\lambda = 1.064\ \mu\text{m}$. The calculated data on the spectral photosensitivity of the photodiode with a filter also well agree with the experiment.

Thus, the chosen simulation technique allows taking into account most design and technological characteristics of the photodiodes during theoretical simulation, which makes it possible to accurately predict and optimize their parameters for a specific practical task and improve the manufacturing process of the photodiodes.

Keywords: Ge, p-i-n photodiode, spectral photosensitivity, pulsed laser rangefinder, theoretical modeling.

REFERENCES

1. Molebny V., McManamon P., Steinvall O. et al. Laser radar: historical prospective — from the East to the West. *Optical Engineering*, 2016, no. 56(3), pp. 031220, <https://doi.org/10.1117/1.OE.56.3.031220>

2. Bokshanskiy V.B., Bondarenko D.A., Vyazovkykh M.V. et al. *Lazernyye pribory i metody izmereniya dal'nosti* [Laser devices and methods for measuring range]. Moscow, Publishing house of Bauman Moscow Sate Technical University, 2012. (Rus)

3. Firago A.V., Petrovich I.P., Buyko A.S., Shumak D.V. *Uvelicheniye dal'nosti deystviya lazernykh dal'nomerov s bezopasnym dlya glaz izlucheniym* [Long range laser rangefinders with eye-safe radiation]. Minsk, Publishing house of BSU, 2010. (Rus)

4. Belov I.Yu. *Fizicheskiye osnovy opticheskoy dal'nometrii* [Physical fundamentals of optical ranging]. Kazan, KSU, 2009. (Rus)

5. Fedorenko A.V., Kachur N.V., Maslov V.P., Arustamyan A.E. [Trends in the development of laser rangefinder devices] *Proceedings of the V All-Ukrainian scientific-practical conf. “Research: prospects for innovation in society and technology development”*. Ukraine, Kharkiv, 2017, pp. 86–90. (Ukr)

6. Fedorenko A.V., Mel'nyk V.K. [Ways to increase the sensitivity of the photodetector channel of a pulsed laser rangefinder]. *Materials of the first international scientific-practical conference “Elements, devices and systems of electronic equipment” (EPSET-18)*. Ukraine, Zaporizhzhia, 2018 r., pp. 68–69. (Ukr)

7. Bol'shakov T.D., Samokhvalov A.K., Uvarova S.D. et al. [Method of manufacture and parameters of Ge p-i-n-photodiodes]. *Priladnaya Fizika (Applied Physics)*, 2012, no. 4, pp. 115–119. (Rus)

8. Ryuhtin V. V., Dobrovolsky Yu. G. Features of development thermostabilized germanium of photo diodes. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2004, no. 6, pp. 45–48. (Rus)
9. Kapasso F., Pirsoll T., Pollak M. i dr. *Tekhnika opticheskoy svyazi. Fotopriyemniki* [Optical communication technology. Photodetectors]. Moscow, Mir, 1988. (Rus)
10. Glushchenko A.R., Gordiyenko V.I., Burkovskiy A.A. et al. *Lazernyye sistemy tankovykh pritselov* [Laser systems of tank sights]. Cherkasy, MacLaut, 2009, 600 p. (Rus)
11. Yanushenkov Yu.G., Lukantsev V.N., Kolosov M.P. *Metody bor'by s pomekhami v optiko-elektronnykh priborakh* [Methods of dealing with interference in optoelectronic devices]. Moscow, Radio i Svyaz', 1981, 179 p. (Rus)
12. Rogal'skiy A. *Infrakrasnyye detektory* [Infrared detectors]. Novosibirsk, Nauka, 2003, 636 p. (Rus)
13. Khinrikus Kh.V. *Shumy v lazernykh informatsionnykh sistemakh* [Noises in laser information systems]. Moscow, Radio i Svyaz', 1987, 108 p. (Rus)
14. Zverev G.M., Zemlyanov M.M., Koronov A.A. [The action of a powerful laser pulse on a germanium avalanche photodiode]. *Prikladnaya Fizika (Applied Physics)*, 2015, no. 2, pp. 79–83. (Rus)
15. Koronov A.A., Zverev G.M., Zemlyanov M.M. et al. [Study of the characteristics of a germanium avalanche photodiode subjected to powerful laser radiation]. *Prikladnaya Fizika (Applied Physics)*, 2015, no. 4, pp. 54–58 (Rus)
16. Koronov A.A., Safutin A.Ye., Zemlyanov M.M., Zverev G.M. [Improving the resistance of photodetectors based on a germanium avalanche photodiode to the effects of powerful laser radiation]. *Prikladnaya Fizika (Applied Physics)*, 2015, no. 6, pp. 65–69 (Rus)
17. Anisimova I.D., Vikulin I.M., Zaitov F.A. et al. *Poluprovodnikovyye fotopriyemniki: ul'trafioletovyy, vidimyy i blizhniy infrakrasnyy diapazon spektra* [Semiconductor photodetectors: ultraviolet, visible and near infrared]. Moscow, Radio i Svyaz', 1984, 216 p. (Rus)
18. Rzhанov A.V. (ed) *Svoystva struktur metall – dielektrik – poluprovodnik* [Properties of metal – dielectric – semiconductor structures]. Moscow, Nauka, 1976, 280 p. (Rus)
19. Sze S. M. *Physics of Semiconductor Devices. Vol. 1*. Wiley, New York, 1981, p. 444.
20. Sharma B.L., Purokhit R.K. *Poluprovodnikovyye geteroperekhody* [Semiconductor heterojunctions]. Moscow, Sov. Radio, 1979. (Rus)
21. Maslov V.P., Sukach A.V., Tet'orkin V.V. et al. [Features of manufacturing, electrical and photoelectric properties of diffusion Ge p–i–n-photodiodes]. *Optoelectronics and semiconductor technics*, 2018, iss. 53, pp. 188–198. (Ukr)
22. Tet'orkin V.V. et al. *Hermaniyevyy fotoperetvoryuvach ta sposib yoho vyhotovlennya* [Germanium photoconverter and method of its production]. Patent UA no. 120653, 2020. (Ukr)
23. Luft B.D., Perevoshchikov V.A., Vozmilova L.N. et al. *Fiziko-khimicheskiye metody obrabotki poverkhnosti poluprovodnikov* [Physicochemical methods for surface treatment of semiconductors]. Moscow, Radio i Svyaz', 1982. (Rus)
24. Perevoshchikov V.A., Skupov V.D. *Osobennosti abrazivnoy i khimicheskoy obrabotki poverkhnosti poluprovodnikov* [Features abrasive and chemical surface treatment of semiconductors]. Nizhny Novgorod, UNN, 1992. (Rus)
25. Baranskiy P.I., Klochkov V.P., Potyachev I.V. *Poluprovodnikovaya elektronika. Svoystva materialov. Spravochnik* [Semiconductor electronics. Material properties. Reference book]. Kyiv, Nauk. Dumka, 1975. (Rus)
26. Maslov V.P. et al. *Dystantsiynyy datchyk temperatury* [Remote temperature sensor]. Pat. UA no. 125612, 2018. (Ukr)
27. Amotchkina T., Trubetskov M., Hahner D., Pervak V. *Characterization of e-beam evaporated Ge, YbF₃, ZnS, and LaF₃ thin films for laser-oriented coatings*. Appl. Opt., 2020, vol. 59, iss. 5, pp. A40–A47, <https://doi.org/10.1364/AO.59.000A40>
28. Palik E. D. *Handbook of Optical Constants of Solids*. NY, Academic Press, 1985, 468 p.

DOI: 10.15222/ТКЕА2020.3-4.17
УДК 621.315.592

А. В. ФЕДОРЕНКО

Украина, г. Киев, ИФП им. В. Е. Лашкарёва НАН Украины
E-mail: aaartemaa@gmail.com

СПЕКТРАЛЬНАЯ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ДИФФУЗНЫХ Ge-p-i-n-ФОТОДИОДОВ

Описан процесс изготовления диффузионным методом быстродействующих Ge-p-i-n-фотодиодов для лазерного дальномера. В качестве пассивирующего слоя был выбран ZnSe. На основе существующих теоретических моделей исследована их спектральная ампер-ваттная чувствительность при различных значениях параметров активной области и проведено сравнение с результатами измерений. Показана удовлетворительная сходимость теоретической зависимости с экспериментальными данными.

Проведены исследования спектральной фоточувствительности фотодиода с кремниевым фильтром, просветленным в диапазоне $\lambda = 1,4 - 1,6$ мкм. Установлен спектральный диапазон их чувствительности: $\lambda = 1,1 - 1,7$ мкм. Максимум фоточувствительности приходится на длину волны $\lambda = 1,54$ мкм и составляет 0,42 А/Вт. Обосновано предположение об устойчивости такого фотодиода к “слепящему” лазерному излучению с $\lambda = 1,064$ мкм.

Таким образом, выбранная методика моделирования позволяет учитывать большинство конструкционных и технологических особенностей фотодиодов при проведении теоретического моделирования, что позволяет достаточно точно прогнозировать и оптимизировать их параметры для конкретной практической задачи и усовершенствовать процесс их изготовления.

Ключевые слова: Ge, p-i-n-фотодиод, спектральная фоточувствительность, импульсный лазерный дальномер, теоретическое моделирование.

Опис статті для цитування:

Федоренко А. В. Спектральна фоточувствительність дифузійних Ge-p-i-n-фотодіодів. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 2020, № 3–4, с. 17–23. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2020.3-4.17>

Cite the article as:

Fedorenko A.V. Spectral photosensitivity of diffused Ge p–i–n-photodiodes. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2020, no. 3–4, pp. 17–23. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2020.3-4.17>