

АНОТАЦІЯ

Фодоренко А.В.. Вдосконалений германієвий р-і-n фотоприймач на довжину хвилі 1,54 мкм. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали». – Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, Київ, 2021.

Дисертація присвячена розробці вдосконаленого германієвого р-і-n фотоприймача для сучасних лазерних далекомірів та сенсорно-вимірювальних приладів на довжину хвилі 1,54 мкм, що більш безпечно для ока людини в порівнянні з 1,06 мкм, яка використовується в сучасних далекомірах. Розроблена конструкція та технологія виготовлення надійного, швидкодіючого і високочутливого Ge р-і-n фотодіоду, яка захищена патентом України на винахід та експериментально показано перспективи його застосування.

Актуальною проблемою існуючих германієвих р-і-n-фотодіодів яку потрібно вирішити є низька надійність та їх висока деградація з часом. Ця проблема пов'язана з використанням в якості пасивуючих шарів - SiO_2 , Si_3N_4 , ZrO_2 , або фіаніту, постійна решітка та коефіцієнт термічного розширення яких, значно відрізняється від Ge, в результаті чого утворюється велика кількість дислокацій та дефектів. В роботі була запропонована ідея підвищення надійності Ge р-і-n фотодіоду, за рахунок застосування в якості пасивуючого покриття селеніду цинку (ZnSe). Цей матеріал має коефіцієнт термічного розширення, який становить $6,1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, максимально наближеного до відповідного показника для германію - $7,1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Зменшення поверхневих струмів досягається за рахунок великої забороненої зони 2,7 eV ZnSe , в порівнянні з власним Ge 0.67 eV. ZnSe має високу прозорість в ІЧ-діапазоні випромінювання, тому його можна наносити як на фронтальну поверхню фотоприймача, так і на бічну поверхню для захисту р-n переходу. В роботі експериментально доведено, що пасивація

поверхні Ge p-i-n фотодіода ZnSe дозволила досягти поліпшення його характеристик і надійності.

В розділі 1 проаналізовано публікації, з яких встановлено, що Ge p-i-n фотодіоди найбільш широко застосовуються та активно розвиваються в волоконно-оптичних лініях зв'язку, лазерних далекомірах та науково-вимірювальних приладах, які працюють в ближній інфрачервоної області спектру. Визначено, що тенденція розвитку фотодіодів імпульсних лазерних далекомірів військового призначення комплексно пов'язана зі створенням нових джерел імпульсного лазерного випромінювання на довжину безпечної для ока хвилі 1,54 мкм з діодним «накачуванням», що суттєво підвищує точність та дальність вимірювань, надійність приладу, зменшує габарити та енергоспоживання. Для Ge p-i-n фотодіодів визначені наступні напрямки вдосконалення: зменшення власних шумів та поверхневих реєструючих струмів за рахунок застосування нового пасивуючого покриття, підвищення надійності та чутливості за рахунок пошуку застосування спеціального вузькосмугового фільтру та просвітлюючих покриттів для деталей всього оптичного тракту фотоприймальних пристроїв.

Окрім того, літературний пошук показав, що одним із перспективних напрямків є застосування Ge p-i-n фотодіодів для наукових досліджень, а саме в приладах на основі явища поверхневого плазмонного резонансу в ближній інфрачервоної області спектру, можливості роботи в якій недостатньо досліджено в існуючих публікаціях. Ці роботи доцільно провести на базі Інституту фізики напівпровідників ім В.Є. Лашкарьова НАН України з застосуванням вдосконаленого Ge p-i-n фотодіоду.

В розділі 2 наведено моделювання спектральних параметрів швидкодіючого Ge p-i-n фотодіоду, описано розробку корпусу фотодіоду з вхідним кремнієвим вікном. Вихідними параметрами габаритних розмірів Ge p-i-n фотодіоду були обрані значення ($\varnothing=0,6$ см; $l=2$ см) відповідними до фотоприймача далекомірних систем, що серійно випускались на $\lambda_{\max}=1,06$

мкм державним підприємством Укроборонпрому НВК «Фотоприлад». Такий підхід дозволив використати конструкторську документацію блоку фотоприймача та технологічну підготовку виробництва цього підприємства. Вхідне вікно розробленого Ge p-i-n фотоприймача, площею 0,5 см², було виготовлено з монокристалу кремнію n- типу легованого фосфором, питомий опір 15 Ом/см. На ЦКБ «Арсенал» було нанесено одношарове просвітлююче покриття HfO₂ з обох сторін кремнієвого вікна, що дало змогу досягти коефіцієнту пропускання на $\lambda_{\max} = 1,54$ мкм рівню 96%.

Для оптимізації та перевірки обраної технології виготовлення Ge p-i-n фотодіодів було проведено моделювання спектральної фоточутливості Ge p-i-n фотодіодів. Результати моделювання були підтверджені вимірюваннями експериментальних зразків вдосконалених Ge p-i-n фотодіодів з похибкою вимірювання $\pm 0,01$ А/Вт.

В розділі 3 наведена технологія виготовлення вдосконаленого Ge p-i-n фотоприймача та результати вимірювання його характеристик. Розроблено технологічні режими виготовлення швидкодіючих Ge p-i-n переходів одночасною дифузією акцепторних домішок Zn та In двотемпературним способом у підкладки n-Ge з питомим опором 15 Ом·см. Запропоновано новий спосіб пасивації та захисту мезаструктури переходів полікристалічним шаром ZnSe, який мав такі переваги:

- параметр узгодженості кристалічних ґраток контактуючих матеріалів не перевищує 0,2%;
- питомий опір полікристалічного шару, вирощеного зі спеціально нелегованого матеріалу, більший ніж 10^{10} Ом·см при $T = 300$ К;
- коефіцієнти лінійного термічного розширення при $T = 300$ К близькі за значенням і становлять $\sim 7 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹ для ZnSe та $\sim 6 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹ для Ge, що сприяє зменшенню механічних напружень системи «пасивуючий шар

ZnSe – активна область р-п переходу» у порівнянні з широко застосовуваним Si_3N_4 і дає можливість формувати діелектричні шари товщиною >1 мкм.

Застосування в якості пасивуючого шару ZnSe дозволило досягти зменшення рівня механічних напружень поверхневого шару та пов'язанні з цим концентрацію дислокації та дефектів, які є причиною поверхневих струмів в фотодіоді. Фотодіоди з таким шаром показали відсутність деградації їх робочих параметрів протягом 3х років (з моменту виготовлення 2018 р. до 2021 р.).

Експериментально досліджено транспорт носіїв заряду при прямих та зворотних зміщеннях р-і-п переходів в інтервалі температур 227–316 К. Показано, що на прямих ВАХ переходів для всіх досліджуваних температур присутня високоомна і-область. Встановлено, що ВАХ переходів визначають дифузійний та генераційно-рекомбінаційний струм, причому вклад дифузійної компоненти є основним, що свідчить про високу якість р-і-п переходу.

Розроблено метод вимірювання електричного опору тонких пасивуючих плівок з використанням еластичних контактів, який має такі переваги в порівнянні з чотирьохзондовим методом:

- велика площа контактної зони і, як наслідок, - мала щільність струму і відсутність нагріву за рахунок виділення тепла Джоуля;
- малий тиск на поверхню напівпровідника, що забезпечує мінімізація пошкоджень поверхні;
- використання контактів з максимальною площею які перекривають весь зразок дозволяє уникнути впливу геометричних похибок.

Проведено дослідження властивостей пасивуючого шару на модельних зразках площею 1 см^2 і товщиною плівок ZnSe і Se 0,5-1,8 мкм, на підкладках Ge і контрольних зразках плівок тієї ж товщини на склі. Рентгенівські дослідження показали наявність текстурованих фаз GeSe і GeSe_2 в зразках, як

з плівками ZnSe так і з плівками Se. Електричний опір зразків ZnSe на Ge підкладці, в порівнянні з опором зразків Se на Ge підкладці більше на 30%. З огляду на ці результати по електроопору, в сукупності з тим, що за рахунок малої різниці постійних решітки та коефіцієнтів термічного розширення плівки ZnSe з Ge та кращого коефіцієнту пропускання 0,64 в порівнянні з Se 0,48 (на склі однакової товщини) пасивація шаром ZnSe Ge фотодіодів є оптимальною.

В розділі 4 показано перспективи і напрямки застосування вдосконаленого Ge p-i-n фотодіоду. Результати дослідження роботи Ge p-i-n фотодіоду в складі макету імпульсного лазерного далекоміру показали, що такий фотодіод має достатню швидкодію для надійного реєстрування коротких імпульсів порядку 20 нс (час релаксації τ склав $5,8 \cdot 10^{-8}$ с). В результаті експерименту було встановлено порогову чутливість фотоприймача в $E_{\phi 1-4} = 253$ нДж, а сумарний коефіцієнт пропускання в цьому випадку становив $k_{\phi 1-4} = 0,000437$, що на порядок більше ніж коефіцієнт пропускання при вимірюванні відстані 5 км $k_{\text{атм}} = 0,0038$. Проведені дослідження дозволяють зробити висновок, що розроблений швидкодіючий Ge p-i-n фотодіод може бути успішно використаний в якості фотоприймача для імпульсного лазерного далекоміру військового призначення.

Для наукового приладобудування одним із перспективних напрямків застосування розробленого Ge p-i-n фотодіоду було використання його для створення вимірювального сенсору базуючогось на явищі поверхневого плазмонного резонансу в інфрачервоній області спектру. В порівнянні з серійно виготовленим Ge p-n фотодіодом при переході від довжини хвилі 1310 нм до 1550 нм він має такі переваги:

- динамічний діапазон зростає на 15% більше;
- відгук сенсору зростає на 80% більше;
- наявність кремнієвого фільтра унеможливорює потрапляння в інформаційний канал завадового сигналу.

Термостабілізація розробленого Ge p-i-n фотодіоду за рахунок алюмінієвого радіатора з елементом Пельтьє та оптимізація режиму роботи лазера, дозволила мінімізувати температурний дрейф.

Експериментальні дослідження таким чином довели перспективність застосування розробленого Ge p-i-n фотодіоду в складі вимірювального приладу базуючогось на явищі поверхневого плазмонного резонансу в інфрачервоній області спектру.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

1. Вперше запропоновано новий спосіб пасивації та захисту Ge мезаструктури переходів полікристалічним шаром ZnSe, який має такі переваги:

- параметр неузгодженості кристалічних ґраток контактуючих матеріалів не перевищує 0,2%;
- питомий опір полікристалічного шару, вирощеного зі спеціально нелегованого матеріалу, більший ніж 10^{10} Ом·см при $T = 300$ К;
- коефіцієнти лінійного термічного розширення при $T = 300$ К близькі за значенням і становлять $\sim 7 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹ для ZnSe та $\sim 6 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹ для Ge, що сприяє зменшенню механічних напружень системи «пасивуючий шар ZnSe – активна область p-n переходу» у порівнянні з широко застосовуваним Si₃N₄ і дає можливість формувати діелектричні шари товщиною >1 мкм.

Ці переваги дозволяють зменшити рівень механічних напружень поверхневого шару та пов'язанні з цим концентрація дислокації та дефектів, які є основною причиною поверхневих струмів в фотодіоді, що забезпечує відсутність деградації протягом 3х років з моменту виготовлення 2018 р. до 2021.

2. Проведено моделювання та теоретичні розрахунки енергетичної структури Ge p-i-n фотодіоду та його спектральної чутливості Результати

моделювання були підтвердженні вимірюваннями на експериментальних зразках з похибкою вимірювання $\pm 0,01$ А/Вт. Дослідження підтвердили можливість застосування теоретичної моделі для досягнення необхідної зонної структури фотодіоду та оптимізації його конструкції.

3. Вперше встановлено вплив фазового складу ZnSe/Ge на електроопір пасивуючого шару ZnSe. Для цього було розроблено методику вимірювання електричного опору високоомних тонких плівок з використанням еластичних контактів, яка має такі переваги в порівнянні з чотирьохзондовим методом: малий тиск на поверхню напівпровідника, велика площа контактної зони і як наслідок при вимірюваннях високоомних поверхневих шарів забезпечується мала густина струму та відсутність нагріву.

Практичне значення одержаних результатів полягає у наступному:

1. Вперше розроблено вдосконалений високонадійний Ge p-i-n фотодіод, який володіє параметрами необхідними для фотоприймачів в складі імпульсного лазерного далекоміра та має час релаксації $5,8 \cdot 10^{-8}$ с і порогову чутливість $E_{\phi}=253$ нДж. Науково-технічне рішення захищено патентом України на винахід: «Германієвий фотоперетворювач та спосіб його виготовлення» // № 120653 –2020 – Бюл. №1 Тетьоркін В.В., Сукач А.В., Ворощенко А.Т., Луцишин І.Г., Венгер Є.Ф., Маслов В.П., Качур Н.В., Федоренко А.В.

2. Експериментально доведено перспективність вдосконаленого Ge p-i-n фотодіоду у складі імпульсного лазерного далекоміра. Такий фотодіод має достатню швидкодію для надійного реєстрування коротких імпульсів (порядку 20 нс). В результаті експерименту було встановлено порогову чутливість фотоприймача в $E_{\phi 1-4}=253$ нДж. Сумарний коефіцієнт пропускання світлофільтрів, які послаблювали імпульс лазера ($E_{\text{вих}} = 578$ мкДж) становив $k_{\phi 1-4} = 0,000437$, що на порядок більше, ніж теоретично розрахований коефіцієнт пропускання при вимірюванні відстані 5 км ($k_{\text{атм}} = 0,0038$) та

відповідає технічним вимогам до фотодіоду в складі імпульсного лазерного далекоміру.

3. Показано перспективність застосування розробленого Ge p-i-n фотодіоду у складі макету приладу на основі явища поверхневого плазмонного резонансу, що працює в ближньому інфрачервоному діапазоні спектру. Результати дослідження підтвердили перспективність застосування розробленого Ge p-i-n фотодіоду у складі вимірювального приладу на основі явища поверхневого плазмонного резонансу з чутливістю, наприклад, до розчинів глюкози $72 \text{ мВ} \cdot \text{мг}^{-1}$.

Результати досліджень, проведених в роботі, є перспективними для застосування у промисловості та в науковій діяльності. Розглянуто практичне застосування розробленого вдосконаленого швидкодіючого Ge p-i-n фотодіоду. Результати досліджень підтверджені відповідними актами впровадження Інститут монокристалів НАН України та Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України.

Ключові слова: довжина хвилі, інфрачервона область, фотоприймач, Ge p-i-n фотодіод, пасивуючий шар ZnSe, імпульсний лазерний далекомір, вимірювальний прилад на основі явища поверхневого плазмонного резонансу.

SUMMARY

Fodorenko AV. Advanced germanium p-i-n photodetector for a wavelength of 1.54 μm . - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of philosophy on a specialty 105 "Applied physics and nanomaterials". - Institute of Semiconductor Physics. V.Ye. Lashkareva National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2021.

The dissertation is devoted to the development of an advanced germanium p-i-n photodetector for modern laser rangefinders and sensor-measuring devices at a wavelength of 1.54 μm , which is safer for the human eye compared to 1.06 μm used in modern rangefinders. The design and technology of manufacturing a reliable, high-speed and highly sensitive Ge p-i-n photodiode, which is protected by a patent for the invention of Ukraine, has been developed and the prospects of its application have been experimentally shown.

The current problem of existing germanium p-i-n photodiodes that needs to be solved is low reliability and their high degradation over time. This problem is associated with the use as passive layers - SiO_2 , Si_3N_4 , ZrO_2 , or cubic zirconia, the constant lattice and the coefficient of thermal expansion of which differs significantly from Ge, resulting in a large number of dislocations and defects. The idea of increasing the reliability of Ge p-i-n photodiode was proposed due to the use of zinc selenide (ZnSe) as a passivating coating. This material has a coefficient of thermal expansion, which is $6.1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, as close as possible to the corresponding figure for germanium - $7.1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. The reduction of surface currents is achieved due to the large band gap of 2.7 eV ZnSe, compared with its own Ge 0.67 eV. ZnSe has a high transparency in the IR range of radiation, so it can be applied to both the front surface of the photodetector and the side surface to protect the p-n junction. The paper experimentally proves that the passivation of the Ge p-i-n photodiode with ZnSe allowed to achieve an improvement in its characteristics and reliability.

Section 1 analyzes the publications, of which Ge p-i-n photodiodes are most widely used and actively developed in fiber-optic communication lines, laser rangefinders and as optical sensors in devices operating in the near-infrared region of the spectrum. It is determined that the trend of development of photodiodes of pulsed laser rangefinders for military purposes is complexly associated with the creation of new sources of pulsed laser radiation at an eye-safe wavelength of 1.54 μm with diode "pumping", which significantly increases the accuracy and range of measurements, reduces the reliability of the device. dimensions and energy consumption. The following areas of improvement have been identified for Ge p-i-n photodiodes: reduction of intrinsic noise and surface recording currents due to the use of a new passivation coating, increase of reliability and sensitivity by finding a special narrowband filter and illuminating coatings for parts of the entire optical path of photodetectors.

In addition, the literature search showed that one of the promising areas is the use of Ge p-i-n photodiodes for research, namely in devices based on the phenomenon of surface plasmon resonance in the near infrared region of the spectrum, the possibility of which is insufficiently studied in existing publications. These works should be carried out on the basis of the Institute of Semiconductor Physics named after V.Ye. Lashkaryova NAS of Ukraine using an improved Ge p-i-n photodiode.

Section 2 presents modeling of structural and spectral parameters of a high-speed Ge p-i-n photodiode, describes the development of a photodiode housing with an input silicon window. The initial parameters of the overall dimensions of the Ge p-i-n photodiode were selected values ($\varnothing = 0.6 \text{ cm}$; $l = 2 \text{ cm}$) for the photodetector of rangefinder systems, which were serially produced at $\lambda_{\text{max}} = 1.06 \mu\text{m}$ by the state enterprise Ukroboronprom NVK "Fotoprilad". This approach allowed to use the design documentation of the photodetector unit and technological preparation of the production of this enterprise. The entrance window of the developed Ge p-i-n photodetector, with an area of 0.5 cm^2 , was made of n-type single crystal of

phosphorus doped with silicon, resistivity 15 Ohm / cm. A single-layer translucent HfO₂ coating was applied to the Arsenal Design Bureau on both sides of the silicon window, which made it possible to achieve a transmittance of $\lambda_{\max} = 1.54 \mu\text{m}$ equal to 96%.

To optimize and verify the chosen technology of manufacturing Ge p-i-n photodiodes, the simulation of the spectral photosensitivity of Ge p-i-n photodiodes was performed. The simulation results were confirmed by measurements of experimental samples of improved Ge p-i-n photodiodes with a measurement error of $\pm 0.01 \text{ A/W}$.

Section 3 presents the technology of manufacturing an advanced Ge p-i-n photodetector and the results of measuring its characteristics. Technological modes of manufacturing high-speed Ge p-i-n transitions by simultaneous diffusion of acceptor impurities Zn and In by two-temperature method into n-Ge substrates with a resistivity of 15 Ohm · cm have been developed. A new method of passivation and protection of the mesostructure of transitions by the polycrystalline ZnSe layer is proposed, which had the following advantages:

- the parameter of inconsistency of the crystal lattice of contacting materials does not exceed 0.2%;
- the resistivity of the polycrystalline layer grown from a specially undoped material is greater than $10^{10} \text{ Ohm} \cdot \text{cm}$ at $T = 300 \text{ K}$;
- coefficients of linear thermal expansion at $T = 300 \text{ K}$ are close in value and are $\sim 7 \cdot 10^{-6} \text{ deg}^{-1}$ for ZnSe and $\sim 6 \cdot 10^{-6} \text{ deg}^{-1}$ for Ge, which helps to reduce the mechanical stresses of the system «passive layer ZnSe - active region of the pn junction "in comparison with the widely used Si₃N₄ and makes it possible to form dielectric layers with a thickness of $> 1 \mu\text{m}$.

Reducing the level of mechanical stresses of the surface layer and the associated concentration of dislocations and defects that cause surface currents in the photodiode, and photodiodes with such a layer showed no degradation of their

operating parameters for 3 years (from the date of manufacture in 2018 to the present).

The transport of charge carriers at direct and inverse displacements of p-i-n junctions in the temperature range 227–316 K was experimentally investigated. It is established that the I – V characteristics of the transitions determine the diffusion and generation-recombination current, and the contribution of the diffusion component is the main one, which indicates the high quality of the p-i-n junction.

A method for measuring the electrical resistance of thin passivating films using elastic contacts has been developed, which has the following advantages over the four-probe method:

- large area of the contact zone and, as a consequence, - low current density and lack of heating due to the release of Joule heat;
- low pressure on the surface of the semiconductor, which minimizes surface damage;
- the use of contacts with a maximum area overlapping the entire sample avoids the influence of geometric errors.

The properties of the passivating layer were studied on model samples with an area of 1 cm² and a film thickness of ZnSe and Se of 0.5-1.8 μm, on Ge substrates and control samples of films of the same thickness on glass. X-ray studies showed the presence of textured phases of GeSe and GeSe₂ in samples with both ZnSe films and Se films. The electrical resistance of ZnSe samples on Ge substrate, compared with the resistance of Se samples on Ge substrate more than 30%. Given these results on the electrical resistance, combined with the fact that due to the small difference between the constant lattice and the coefficients of thermal expansion of the ZnSe film with Ge and the better transmittance of 0.64 compared to Se 0.48 (on glass of the same thickness) passivation layer ZnSe Ge photodiodes are optimal.

Section 4 shows the prospects and directions of application of the improved Ge p-i-n photodiode. The results of the study of the Ge p-i-n photodiode in the model of the pulsed laser rangefinder showed that such a photodiode has sufficient speed for reliable recording of short pulses of the order of 20 ns (relaxation time τ was $5.8 \cdot 10^{-8}$ s). As a result of the experiment, the threshold sensitivity of the photodetector was set to $E_{fl-4} = 253$ nJ, and the total transmittance in this case was $k_{fl-4} = 0.000437$, which is an order of magnitude greater than the transmittance of the atmosphere at a distance of 5 km $k_{ATM} = 0, 0038$. The research allows us to conclude that the developed high-speed Ge p-i-n photodiode can be successfully used as a photodetector for a pulsed laser rangefinder for military purposes.

For scientific instrumentation, one of the promising areas of application of the developed Ge p-i-n photodiode was its use to create a measuring sensor based on the phenomenon of surface plasmon resonance in the infrared region of the spectrum. In comparison with the mass-produced Ge p-n photodiode in the transition from a wavelength of 1310 nm to 1550 nm, it has the following advantages:

- dynamic range increases by 15% more;
- sensor response increases by 80% more;
- the presence of a silicon filter makes it impossible for the interference signal to enter the information channel.

Thermal stabilization of the developed Ge p-i-n photodiode due to an aluminum radiator with a Peltier element and optimization of the laser operation mode allowed to minimize the temperature drift.

Experimental studies have thus proved the prospects of using the developed Ge p-i-n photodiode as part of a sensor based on the phenomenon of surface plasmon resonance in the infrared region of the spectrum.

The scientific novelty of the obtained results is as follows:

1. New method of passivation and protection of Ge mesostructure by a polycrystalline ZnSe layer is proposed, which has the following advantages:

- the mismatch parameter of the crystal lattice of the contacting materials does not exceed 0.2%;

- the resistivity of the polycrystalline layer grown from a specially undoped material is greater than 10^{10} Ohm*cm at $T = 300$ K;

- the coefficients of linear thermal expansion at $T = 300$ K are close in value and are $\sim 7 \cdot 10^{-6}$ deg⁻¹ for ZnSe and $\sim 6 \cdot 10^{-6}$ deg⁻¹ for Ge, which helps to reduce the mechanical stresses of the system “the passive layer ZnSe - active region of the p-n junction” in comparison with the widely used Si₃N₄ and makes it possible to form dielectric layers > 1 μm thick.

These advantages reduce the level of mechanical stresses of the surface layer and the associated concentration of dislocations and defects that are the main cause of surface currents in the photodiode, which ensures no degradation for 3 years from the date of production in 2018 to 2021.

2. Simulation and theoretical calculations of the energy structure of the Ge p-i-n photodiode and its spectral sensitivity were performed. The simulation results were confirmed by measurements on experimental samples with a measurement error of ± 0.01 A / W. Studies have confirmed the possibility of using a theoretical model to achieve the required band structure of the photodiode and optimize its design.

3. The influence of the ZnSe / Ge phase composition on the electrical resistance of the ZnSe passivation layer was established for the first time. To do this, a method of measuring the electrical resistance of high-impedance thin films using elastic contacts was developed, which has the following advantages over the four-probe method: low pressure on the semiconductor surface, large contact area and as a result when measuring high-impedance surface layers heating.

The practical significance of the obtained results is as follows:

1. For the first time, an improved highly reliable Ge p-i-n photodiode has been developed, which has the parameters required for photodetectors as part of a pulsed laser rangefinder and has a relaxation time of $5.8 \cdot 10^{-8}$ s and a threshold sensitivity $E_f = 253$ nJ. The scientific and technical solution is protected by the patent of Ukraine for the invention: "Germanium photodetector and method of its manufacture" // № 120653 –2020 - Bull. №1 Tetyorkin VV, Sukach AV, Voroshchenko AT, Lutsyshyn IG, Wenger EF, Maslov VP, Kachur NV, Fedorenko AV

2. The prospects of the improved Ge p-i-n photodiode as a part of a pulsed laser rangefinder are experimentally proved. This photodiode has sufficient speed for reliable recording of short pulses (about 20 ns). As a result of the experiment, the threshold sensitivity of the photodetector was set to $E_{f1-4} = 253$ nJ. The total transmittance of the filters that attenuated the laser pulse ($E_{out} = 578$ μ J) was $k_{f1-4} = 0.000437$, which is an order of magnitude higher than the theoretically calculated transmittance at a measured distance of 5 km ($k_{atm} = 0.0038$) and meets the technical requirements to the photodiode as part of a pulsed laser rangefinder.

3. The prospects of application of the developed Ge p-i-n photodiode as a part of the model of the device on the basis of the phenomenon of surface plasmon resonance working in the near infrared range of a spectrum are shown. The results of the study confirmed the prospects of using the developed Ge p-i-n photodiode as part of a measuring device based on the phenomenon of surface plasmon resonance with sensitivity, for example, to glucose solutions of 72 mV \cdot mg⁻¹.

The results of research conducted in the work are promising for use in industry and research. The practical application of the developed improved high-speed Ge p-i-n photodiode is considered. The research results are confirmed by the relevant acts of implementation of the Institute of Single Crystals of the National Academy of

Sciences of Ukraine and the Institute of Semiconductor Physics. V.Ye. Lashkareva
National Academy of Sciences of Ukraine.

Keywords: wavelength, infrared region, photodetector, Ge p-i-n photodiode,
passive layer ZnSe, pulsed laser rangefinder, sensor based on the phenomenon of
surface plasmon resonance.