

РІШЕННЯ
спеціалізованої вченої ради PhD 11080 про присудження ступеня
доктора філософії

Спеціалізована вчена рада Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича PhD 11080, Міністерства освіти і науки України, м. Чернівці прийняла рішення про присудження ступеня доктора філософії галузі знань 10 - Природничі науки на підставі прилюдного захисту дисертації «Фотоелектричні явища в кремнієвих планарних n^+p-p^+ - структурах та фізико-технічні аспекти виготовлення фотодіодів на їх основі» за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія «24» листопада 2025 року

Кукурудзяк Микола Степанович 1994 року народження, громадянин України; освіта вища: закінчив у 2018 році Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича за спеціальністю «мікро- та наносистемна техніка» (Магістр). 15 вересня 2024 р. вступив на заочну форму навчання до аспірантури у Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича.

Працює на посаді провідного інженера-технолога в ЦКБ Ритм м. Чернівці з 2017 р. до цього часу. За сумісництвом працює на посаді молодшого наукового співробітника (науково-дослідна робота № 14.813) у Чернівецькому національному університеті імені Юрія Федьковича з 2025 року.

Дисертацію виконано на ЦКБ Ритм та кафедрі електроніки і енергетики Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича. науковий керівник, доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри електроніки і енергетики Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича Едуард Васильович Майструк.

Здобувач має 46 наукових публікацій за темою дисертації, з яких 26 наукових праць, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації: 19 наукових праць у виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України та проіндексованих у наукометричних базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus, 7 наукових праць у закордонних періодичних наукових виданнях, проіндексованих у наукометричних базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus, а також 9 наукових праць, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації, 16 праць, які додатково відображають наукові результати дисертації та 4 патенти на корисну модель:

1. Kukurudziak M. S. 1064 nm wavelength pin photodiode with low influence of periphery on dark currents. *Journal of nano- and electronic physics*. 2022. Vol. 14, No. 1. P. 01023-1 – 01023-4. [https://doi.org/10.21272/jnep.14\(1\).01023](https://doi.org/10.21272/jnep.14(1).01023) (Scopus).

2. Kukurudziak M. S. Formation of dislocations during phosphorus doping in the technology of silicon p-i-n photodiodes and their influence on dark currents. *Journal of nano- and electronic physics*. 2022. Vol. 14, No. 4. P. 04015-1 – 04015-6. [https://doi.org/10.21272/jnep.14\(4\).04015](https://doi.org/10.21272/jnep.14(4).04015) (Scopus).

3. Kukurudziak M. S. Diffusion of phosphorus in technology for manufacturing silicon p-i-n photodiodes. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. 2022. Vol. 25, No. 4. P. 385-393. <https://doi.org/10.15407/spqeo25.04.385> (WoS, Scopus).
4. Kukurudziak M. S. Influence of surface resistance of silicon p-i-n photodiodes n^+ -layer on their electrical parameters. *Physics and chemistry of solid state*. 2022. Vol. 23, No. 4. P. 756-763. <https://doi.org/10.15330/pcss.23.4.756-763> (WoS, Scopus).
5. Kukurudziak M. S. Problems of Masking and Anti-Reflective SiO₂ in Silicon Technology. *East European Journal of Physics*. 2023. No. 2. P. 289-295. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2023-2-33> (WoS, Scopus).
6. Kukurudziak M. S. Isolation of Responsive Elements of Planar Multi-Element Photodiodes. *East European Journal of Physics*. 2023. No. 3. P. 434-440. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2023-3-48> (WoS, Scopus).
7. Кукурудзяк М. С. Дослідження морфології макропористого Si, одержаного металом стимульованим щавленням за допомогою Au. *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*. 2023. Т. 21, №. 3. С. 605-616. <https://doi.org/10.15407/nnn.21.03.605> (Scopus).
8. Kukurudziak M. S., & Lipka V. M. Influence of silicon characteristics on the parameters of manufactured photonics cells. *East European Journal of Physics*. 2023. No. 4. P. 197-205. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2023-4-24> (WoS, Scopus).
9. Kukurudziak M. S. The influence of the structure of guard rings on the dark currents of silicon p-i-n photodiodes. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2023. Vol. 24, No. 4. P. 603-609. <https://doi.org/10.15330/pcss.24.4.603-609> (WoS, Scopus).
10. Kukurudziak M. S., & Maistruk E. V. Study of the Charge Carrier Collection Coefficient of Silicon p-i-n Photodiodes. *East European Journal of Physics*. 2024. No. 1. P. 386-392. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2024-1-39> (Scopus Q3; WoS).
11. Kukurudziak M. S. Effect of Structural Defects on Parameters of Silicon Four-Quadrant p-i-n Photodiodes. *East European Journal of Physics*. 2024. No. 2. P. 345-352. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2024-2-41> (Scopus Q3; WoS).
12. Kukurudziak M. S., Lipka, V. M., & Ryukhtin, V. V. Silicon p-i-n Mesa-Photodiode Technology. *East European Journal of Physics*. 2024. No. 3 P. 385-389. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2024-3-47> (Scopus Q3; WoS).
13. Kukurudziak M. S., Maistruk E. V., & Koziarskyi I. P. Influence of Boron Diffusion on Photovoltaic Parameters of n^+ -p-p⁺ Silicone Structures and Based Photodetectors. *East European Journal of Physics*. 2024. No. 4. P. 289-296. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2024-4-31> (Scopus Q3; WoS).
14. Kukurudziak M. S., & Ryukhtin V. V. Methods of Correction of Spectral Characteristics of Silicon Photodetectors. *East European Journal of Physics*. 2025. No. 1. P. 290-294. <https://doi.org/290-294.10.26565/2312-4334->

[2025-1-34](#) (Scopus Q3 ; WoS).

15. Kukurudziak M. S., & Maistruk E. V. Influence of chromium sublayer on silicon P-I-N photodiodes responsivity. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering: Fifteenth International Conference on Correlation Optics*. 2021, December. Vol. 12126. P. 511-518. <https://doi.org/10.1117/12.2616170>. ISSN: 0277-786X. (WoS, Scopus).

16. Kukurudziak M. S., & Maistruk E. V. High-responsivity silicon p-i-n mesa-photodiode. *Semiconductor Science and Technology*. 2023. Vol. 38, No. 8. P. 085007. <https://doi.org/10.1088/1361-6641/acdf14> (WoS; Scopus Q2).

17. Kukurudziak M. S. A method of increasing the interquadrant resistance of four-quadrant p-i-n photodiodes. *Journal of Instrumentation*. 2024. Vol. 19, No. 9, P. P09006. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/19/09/P09006>. (WoS, Scopus Q3).

18. Kukurudziak M. S., Maistruk E. V., Yatskiv R., Koziarskyi I. P., & Koziarskyi D. P. Silicon p-i-n photodiode with reduced crystallographic defect density and structured surface. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2025. Vol. 58, No. 16. P. 165106. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/adbd4d> (WoS, Scopus Q2).

У дискусії взяли участь голова і члени спеціалізованої вченої ради та присутні на захисті фахівці:

1) *Склярчук Валерій Михайлович* доктор фізико-математичних наук (01.04.10 — Фізика напівпровідників і діелектриків), доцент, доцент кафедри поліграфічних, мультимедійних та оптичних технологій Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича – голова ради.

Зауваження:

1. В Анотації, в якості «Ключові слова» використано термін «детектор фотонів», хоча в роботі жодної інформації про те, що виготовлені *p-i-n* фотодіоди можуть працювати в однофотонному режимі (SPAD) немає.

2. В Анотації в «Практичне значення отриманих результатів» помічено описки:

Встановлено, що при *зниженні* концентрації фосфору та бору в n^+ - та p^+ -шарах відповідно, коефіцієнт їх пропускання *знижується*, ...

3. В Анотації, коли повідомляється, що описано в другому розділі помічено опечатку: *Зменшення товщини* шару хрому призводить до *зниження* його коефіцієнта пропускання

4. В параграфі (2.2.3. Дослідження електричних властивостей кремнієвих n^+ - p переходів) використано термін «висота потенціального бар'єру» - $q\phi_k$, який оцінено шляхом екстраполяції лінійних ділянок ВАХ в області прямого зміщення напруги $q\phi_k \sim 0,6$ еВ. Напруга відсічки V_{off} - це практичний прояв необхідності подолати вбудовану напругу V_{bi} . А висота потенціального бар'єру для *p-i-n* діода рівна $qV_{bi} = E_g - \Delta E$, Де ΔE це сума малих енергетичних відстаней, на яких рівні Фермі відстоять від країв зон (якщо N_a та N_d не викликають повного виродження).

2) *Євтух Анатолій Антонович*, доктор фізико-математичних наук (01.04.10 – фізика напівпровідників і діелектриків), професор, провідний науковий співробітник відділу фізики поверхні та нанофотоніки Інституту фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова НАН України – офіційний опонент.

Зауваження:

1. В роботі часто вживаються терміни n^+p-p^+ -структури, $p-i-n$ -структури, $p-i-n$ -діоди. Тому для покращення сприйняття роботи бажано було б на самому початку вставити фразу «Проводились дослідження та розробки $p-i-n$ -фотодіодів на основі n^+p-p^+ -структур, в яких в якості i -шару використовувався високоомний кремній».

2. Серед опису методів вимірювання автор часто вказує на вимірювання якоїсь величини, але «вимірювання» не є методом. Потрібно вказувати чим і як вимірювали.

3. При дослідженні електричних властивостей $n+p$ -переходів не вказано, які контакти використовувались і чи були вони омичними, оскільки контактний опір може суттєво вплинути на результати вимірювань.

4. Однією з проблем при розробці кремнієвих $p-i-n$ ФД є виникнення інверсійного поверхневого n -шару, який обумовлений наявністю в оксиді кремнію вбудованого позитивного заряду. Не зрозуміло, чому автор не провів дослідження направлені на оптимізацію властивостей шару SiO_2 .

Зокрема, низькотемпературний відпал у водні, або плазмова обробка у водні могли б суттєво зменшити вбудований позитивний заряд.

5. У висновках, щоб підкреслити новизну і оригінальність результатів, бажано було б вказати, які результати отримані вперше.

6. На мою думку термін «детектуємість D^* » є невдалим. Чи є він загально прийнятим? Більш зрозумілим є термін «питома виявна здатність».

7. В тексті зустрічаються граматичні помилки та неточності. Зокрема, вказується довжина хвилі випромінювання YAG лазера 1.05 мкм, замість 1.064 мкм та ін.

3) *Вербицький Володимир Григорович*, доктор технічних наук (05.27.01 – твердотільна електроніка), старший науковий співробітник, професор кафедри мікроелектроніки КПІ ім. Ігоря Сікорського – офіційний опонент.

Зауваження:

1. Для визначення глибини занурення легуючої домішки використовувався метод шар-шліфа, який має певну похибку вимірювання і для його калібровки слід було б використати наприклад вторинно- йонну маспектрометрію.

2. Легування p - і n -областей проводилось із твердого чи газоподібного джерела при високих ($\sim 1000^\circ\text{C}$) температурах. В роботі відсутні дані по процесу зміни концентрацій носіїв зарядів йонними методами, яким

притаманна низька температура та більш відтворюваний технологічний процес.

3. Для проведення досліджень використовувався "бездислокаційний" FZ-Si *p*-тип, але не оцінено густину дефектів ні в об'ємі ні на поверхні кремнію.

4. При проведенні вимірювань електрофізичних параметрів напівпровідникових структур невказані ні абсолютні ні відносні похибки.

5. На деяких малюнках (в Розділі 2) занадто дрібний шрифт особливо там де вставки, що утруднює сприйняття матеріалу.

4) *Шпатар Петро Михайлович*, кандидат технічних наук (05.27.01 Твердотільна електроніка) доцент, директор Навчально-наукового інституту фізико-технічних та комп'ютерних наук Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича – рецензент

Зауваження:

1. У дисертаційній роботі не розкрито потенційне застосування отриманих фотодіодів.

2. В роботі відсутній аналіз впливу товщини *i*-шару на швидкодію фотодіодів.

3. В роботі не наведено аналізу стабільності вольт-амперних характеристик фотодіодів при багаторазовому вимірюванні чи після довготривалої експлуатації чи після термоциклів.

В дисертаційній роботі зустрічаються орфографічні та стилістичні помилки, однак вказані зауваження не впливають на практичну цінність та загальну позитивну оцінку виконаних досліджень.

5) *Орлецький Іван Григорович*, кандидат фізико-математичних наук (01.04.10 Фізика напівпровідників і діелектриків), доцент, доцент кафедри електроніки і енергетики Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича – рецензент.

1. У пункті 3.4. про чотириквadrантний кремнієвий фотодіод підвищеним міжквadrантним опором, детально описано вплив зниження опору ізоляції активних елементів квadrантних фотодіодів на темнові струми охоронного кільця та фоточутливих елементів, а також на коефіцієнт фотоелектричного зв'язку останніх. Власне при описі зміни коефіцієнта фотозв'язку внаслідок зміни опору ізоляції між чутливими елементами йде мова про чутливість. Однак нічого не сказано про вплив зменшення опору ізоляції чутливих елементів та охоронного кільця на чутливість фотодіода. Чи існує така залежність, та який її характер?

2. При аналізі умов виникнення інверсного шару на межі розділу *p*-Si - SiO₂ йде мова про дифузії неконтрольованих домішок під час термічних операцій, однак не вказано, які саме елементи призводять до погіршення електричних параметрів багатоелементних фотодіодів, зокрема опору ізоляції. Доцільно було б назвати ці домішки і вказати їх походження.

електричних параметрів багатоелементних фотодіодів, зокрема опору ізоляції. Доцільно було б назвати ці домішки і вказати їх походження.

3. В дисертаційній роботі дисертант аналізує якість межі розділу p -Si - SiO₂ на основі результатів дослідження C - V -характеристик кремнієвих МОН-структур, однак не приводить значення напруг плоских зон та густини поверхневих станів.

4. Дисертаційна робота написана належною науковою мовою, проте в ній зустрічаються не зовсім вдалі скорочення, орфографічні помилки неточності.

На дисертацію та анотацію Миколи Степановича надійшло два звернення: звернення кандидата фізико-математичних наук, старшого дослідника, керівника відділу фізики і технології фотоелектронних та магнітоактивних матеріалів Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України Євтушенка Арсенія Івановича та доктора фізико-математичних наук, старшого наукового співробітника, професора кафедри загальної фізики Національного університету «Львівська політехніка» Товстюк Наталії Корніївни.

Всі вони позитивні, та не містять зауважень.

Результати голосування :

«За» 5 членів ради,

«Проти» 0 членів ради.

На підставі результатів голосування спеціалізована вчена рада PhD 11080 присуджує Кукурудзяку Миколі Степановичу ступінь доктора філософії з галузі знань 10 – Природничі науки за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія.

**Голова вченої ради PhD 11080,
доктор фізико-математичних
наук, доцент кафедри
поліграфічних, мультимедійних
та оптичних технологій
Чернівецького національного
університету
імені Юрія Федьковича**

Валерій СКЛЯРЧУК