

АНОТАЦІЯ

Кречун М. М. Вплив фазової стабільності системи Fe–Ni–Cr–W на формування гальванічних антидифузійних структур у термоелектричних перетворювачах енергії на основі матеріалів Ві–Те. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали» (10 – Природничі науки). – Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Чернівці, 2026.

Дисертація присвячена теоретичному вивченню впливу фазової стабільності системи Fe–Ni–Cr–W на формування гальванічних антидифузійних структур у термоелектричних перетворювачах енергії на основі матеріалів Ві–Те. Робота спрямована на обґрунтування складу антидифузійних шарів, здатних забезпечити структурну та фазову стабільність контактних з'єднань і підвищити довговічність термоелектричних модулів. Дослідження виконувались з використанням методів аналізу фазових діаграм стану подвійних та побудови потрібних і четверних систем, а також розрахункового аналізу параметрів хімічного зв'язку: ефективних радіусів, ефективних зарядів та енергій дисоціації (енергій міжатомної взаємодії).

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та завдання дослідження, визначено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів. Наведено дані про публікації, апробацію результатів, особистий внесок здобувача, а також описано структуру та обсяг дисертаційної роботи.

У **першому** розділі дисертації приведено огляд та аналіз сучасних наукових досліджень, присвячених теоретичним та експериментальним аспектам термоелектричного перетворення енергії. Детально розглянуто структурно-електронні властивості матеріалів на основі Ві₂Те₃, а також хімічний зв'язок і його вплив на формування контактних з'єднань. Проаналізовано основні варіанти конструкцій термоелектричних модулів і проблеми контактних з'єднань, що виникають у процесі експлуатації. Показано, що міжфазна дифузія та термічні напруження є ключовими чинниками деградації контактів при тривалій

експлуатації. Також у розділі розглянуто сучасні підходи до запобігання дифузійній деградації контактних з'єднань, зокрема використання антидифузійних бар'єрів. Обґрунтовано доцільність застосування багатокомпонентних систем на основі перехідних металів як перспективних матеріалів для підвищення стабільності контактів. Окремо наголошено на важливості обґрунтування вибору системи Fe–Ni–Cr–W як основи для формування антидифузійних шарів і показано роль фазових діаграм стану у виборі матеріалів для гальванічної комутації. Обґрунтовано доцільність застосування гальванічно сформованих антидифузійних шарів і комутаційних структур як альтернативи традиційним з'єднанням, що забезпечує зниження контактного опору, технологічну гнучкість та сумісність із матеріалами на основі Bi–Te.

У **другому** розділі роботи розглядається питання фазових діаграм рівноваги бінарних систем на основі Fe–Ni, Fe–Cr, Fe–W, Ni–Cr, Ni–W та Cr–W, а також систем Bi–Te, Bi–Sn та Sn–Te з урахуванням їх взаємодії в умовах формування контактних з'єднань. Проаналізовано області існування твердих розчинів та межі фазової стабільності компонентів. Запропоновано теоретичну модель впорядковуваних сплавів Bi–Sn–Te, яка дозволяє описувати структурно-електронні особливості матеріалів та враховувати їх при формуванні контактних і бар'єрних шарів. Показано, що в системах Bi–Te, Bi–Sn, Sn–Te наявні низькотемпературні інваріантні перетворення та інтерметалічні фази, утворення яких може призводити до деградації контактів. Це обґрунтовує необхідність використання захисних антидифузійних шарів між матеріалами на основі Bi_2Te_3 та металами. Встановлено, що системи на основі Fe, Ni, Cr, W характеризуються широкими однофазними областями, тоді як взаємодія компонентів у системі Bi–Te–Sn може призводити до утворення небажаних фаз у контактній зоні, що зумовлює необхідність застосування антидифузійних покриттів. Отримані результати аналізу фазових діаграм створюють теоретичне підґрунтя для вибору багатокомпонентної системи Fe–Ni–Cr–W як основи антидифузійних шарів і визначають допустимі інтервали складу та умови їх формування, що є основою для подальших експериментальних досліджень.

У **третьому** розділі застосовано методику побудови багатоконпонентних фазових діаграм стану для аналізу фазової стабільності систем, оптимальних для формування антидифузійних шарів у термоелектричних модулях. Побудовано та проаналізовано потрібні діаграми стану систем Bi–Sn–Te, Fe–Ni–Cr, Fe–Ni–W, Ni–Cr–W та Fe–Cr–W, а також ізотермічні перерізи четверної системи Fe–Ni–Cr–W. На основі аналізу системи Bi–Sn–Te встановлено відсутність широких областей стабільних твердих розчинів і наявність низькотемпературних рівноваг, що створює ризик формування небажаних фаз у контактній зоні та підтверджує необхідність ізоляції матеріалів на основі Bi₂Te₃ від компонентів припою. Показано, що системи Fe–Ni–Cr, Fe–Ni–W, Ni–Cr–W та Fe–Cr–W містять області твердих розчинів, оптимальних для формування антидифузійних шарів, однак введення вольфраму супроводжується звуженням цих областей і можливістю утворення двофазних станів. Це зумовлює необхідність контролю вмісту W у складі антидифузійних шарів. Аналіз четверної системи Fe–Ni–Cr–W дозволив визначити області фазової стабільності; оптимальними є покриття на основі Fe–Ni–Cr з обмеженим вмістом вольфраму. Запропоновано кореляційні моделі, що пов'язують параметри хімічного зв'язку (ефективні радіуси, ефективні заряди атомів та енергії дисоціації) з фазовою стабільністю та технологічними характеристиками контактних шарів, що дає змогу прогнозувати ефективність антидифузійних і комутаційних структур у термоелектричних перетворювачах.

У **четвертому** розділі виконано розрахунковий аналіз параметрів хімічного зв'язку в системі Fe–Ni–Cr–W та при взаємодії її компонентів з компонентами термоелектричного матеріалу і припою – Bi, Te та Sn. Проаналізовано ефективні радіуси, ефективні заряди атомів та енергії дисоціації, як ключові параметри міжатомної взаємодії. Сукупне врахування розмірних і електронних параметрів дозволило кількісно оцінити енергію зв'язку та визначити характер взаємодії між компонентами контактної системи. Показано, що міжатомна взаємодія між компонентами в системах Fe–Ni–Cr–W та Bi–Sn–Te є визначальним фактором деградації контактних з'єднань, що обґрунтовує необхідність застосування

антидифузійних покриттів. Послідовний аналіз ефективних радіусів, ефективних зарядів та енергії дисоціації формує єдину систему параметрів, яка дозволяє інтерпретувати закономірності фазового утворення та процеси формування антидифузійних шарів у межах концепції квантової гальванохімії.

У роботі встановлено, що поєднання аналізу фазових діаграм із параметрами хімічного зв'язку є ефективним інструментом для обґрунтування складу антидифузійних шарів і прогнозування їх стабільності у термоелектричних модулях. Оптимізація складу та конструкції контактних елементів сприяє підвищенню їх термічної та механічної стійкості, що підтверджує функціональну роль бар'єрних шарів і комутаційних структур у забезпеченні довговічності термоелектричних модулів.

Практичне значення отриманих результатів

Отримані результати будуть використані для обґрунтування вибору складу ефективних антидифузійних шарів у технологіях виготовлення, особливо надійних термоелектричних модулів на основі телуриду вісмуту. Встановлені закономірності взаємозв'язку між параметрами хімічного зв'язку та фазовою стабільністю забезпечують оптимізований підбір компонентів покриття з урахуванням їх дифузійної інертності, електропровідності та сумісності з термоелектричним матеріалом і припоєм. Запропонований підхід до аналізу параметрів хімічного зв'язку може бути застосований при оптимізації режимів гальванічного осадження (склад електроліту, концентраційні співвідношення компонентів, густина струму), що забезпечує формування структурно однорідних і термічно стабільних бар'єрних шарів. Це сприяє зниженню контактного електричного опору, обмеженню міжфазної взаємодії та підвищенню ресурсу роботи модулів у тривалих і циклічних теплових режимах. Результати дисертації можуть бути впроваджені при проектуванні багатошарових металевих покриттів для термоелектричних перетворювачів енергії з підвищеною термічною та дифузійною стабільністю.

Ключові слова: напівпровідник, термоелектричні матеріали, наноструктура, тверді розчини, телуриди, n- p- типи, опір, контакт, хімічний зв'язок, бінарні

сполуки, теоретичні моделі, квантові закономірності, електронна густина, діаграми стану, матричний метод.

ABSTRACT

Krechun. M. The influence of the phase stability of the Fe–Ni–Cr–W system on the formation of galvanic anti-diffusion structures in thermoelectric energy converters based on Bi–Te materials. – Qualified scientific work as a manuscript.

Thesis on search for the Doctor of Philosophy degree in specialty 105 «Applied Physics and Nanomaterials» (10 – Natural Sciences). – Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Chernivtsi, 2026.

The dissertation is devoted to the theoretical study of the influence of the phase stability of the Fe–Ni–Cr–W system on the formation of galvanic anti-diffusion structures in thermoelectric energy converters based on Bi–Te materials. The work is aimed at substantiating the composition of anti-diffusion layers capable of ensuring the structural and phase stability of contact connections and increasing the durability of thermoelectric modules. The research was carried out using methods of analyzing phase diagrams of binary states and constructing ternary and quaternary systems, as well as computational analysis of chemical bond parameters: effective radii, effective charges and dissociation energies (interatomic interaction energies).

The introduction substantiates the relevance of the dissertation topic, formulates the goal and objectives of the research, determines the scientific novelty and practical value of the results obtained. It provides data on publications, testing of the results, the personal contribution of the applicant, and also describes the structure and scope of the dissertation work.

The first chapter focuses of the dissertation provides a review and analysis of modern scientific research devoted to theoretical and experimental aspects of thermoelectric energy conversion. The structural and electronic properties of materials based on Bi₂Te₃ are considered in detail, as well as the chemical bond and its influence on the formation of contact joints. The main variants of thermoelectric module designs and the problems of contact joints that arise during operation are analyzed. It is shown

that interfacial diffusion and thermal stresses are key factors in the degradation of contacts during long-term operation. The section also considers modern approaches to preventing diffusion degradation of contact joints, in particular the use of anti-diffusion barriers. The feasibility of using multi-component systems based on transition metals as promising materials for increasing the stability of contacts is substantiated. The importance of substantiating the choice of the Fe–Ni–Cr–W system as the basis for the formation of anti-diffusion layers is separately emphasized and the role of phase diagrams in the selection of materials for galvanic switching is shown. The feasibility of using galvanically formed anti-diffusion layers and switching structures as an alternative to traditional connections, which provides reduced contact resistance, technological flexibility, and compatibility with Bi-Te-based materials, is substantiated.

The second chapter focuses of the work considers the issue of phase diagrams of equilibrium of binary systems based on Fe–Ni, Fe–Cr, Fe–W, Ni–Cr, Ni–W and Cr–W, as well as the Bi–Te, Bi–Sn and Sn–Te systems, taking into account their interaction under the conditions of the formation of contact joints. The regions of existence of solid solutions and the limits of phase stability of the components are analyzed. A theoretical model of ordered Bi–Sn–Te alloys is proposed, which allows describing the structural and electronic features of materials and taking them into account when forming contact and barrier layers. It is shown that in the Bi–Te, Bi–Sn, Sn–Te systems there are low-temperature invariant transformations and intermetallic phases, the formation of which can lead to contact degradation. This justifies the need to use protective anti-diffusion layers between materials based on Bi_2Te_3 and metals. It has been established that systems based on Fe, Ni, Cr, W are characterized by wide single-phase regions, while the interaction of components in the Bi–Te–Sn system can lead to the formation of undesirable phases in the contact zone, which necessitates the use of anti-diffusion coatings. The obtained results of the analysis of phase diagrams create a theoretical basis for the selection of the multi-component system Fe–Ni–Cr–W as the basis of anti-diffusion layers and determine the permissible composition intervals and conditions for their formation, which is the basis for further experimental studies.

The third chapter focuses the method of constructing multicomponent phase diagrams of state is applied to analyze the phase stability of systems optimal for the formation of anti-diffusion layers in thermoelectric modules. Ternary phase diagrams of the Bi–Sn–Te, Fe–Ni–Cr, Fe–Ni–W, Ni–Cr–W and Fe–Cr–W systems, as well as isothermal sections of the Fe–Ni–Cr–W quaternary system, were constructed and analyzed. Based on the analysis of the Bi–Sn–Te system, the absence of wide regions of stable solid solutions and the presence of low-temperature equilibria were established, which creates the risk of the formation of undesirable phases in the contact zone and confirms the need to isolate materials based on Bi₂Te₃ from the solder components. It is shown that the Fe–Ni–Cr, Fe–Ni–W, Ni–Cr–W and Fe–Cr–W systems contain regions of solid solution regions optimal for the formation of anti-diffusion layers; however, the introduction of tungsten is accompanied by a narrowing of these regions and the potential for dual-phase state formation. This necessitates the control of the W content in the anti-diffusion layers. Analysis of the quaternary system Fe–Ni–Cr–W allowed us to determine the regions of phase stability; the optimal coatings are based on Fe–Ni–Cr with a limited tungsten content. Correlation models are proposed that link the parameters of chemical bonding (effective radii, effective atomic charges and dissociation energies) with the phase stability and technological characteristics of contact layers, which makes it possible to predict the effectiveness of anti-diffusion and switching structures in thermoelectric converters.

The fourth chapter focuses a computational analysis of the chemical bond parameters in the Fe–Ni–Cr–W system and the interaction of its components with the components of the thermoelectric material and solder – Bi, Te and Sn was performed. The effective radii, effective charges of atoms and dissociation energies were analyzed as key parameters of interatomic interaction. The combined consideration of dimensional and electronic parameters allowed us to quantitatively estimate the bond energy and determine the nature of the interaction between the components of the contact system. It was shown that the interatomic interaction between the components in the Fe–Ni–Cr–W and Bi–Sn–Te systems is a determining factor in the degradation of contact joints, which justifies the need to use anti-diffusion coatings. A sequential analysis of the effective

radii, effective charges and dissociation energies forms a single system of parameters that allows us to interpret the regularities of phase formation and the processes of formation of anti-diffusion layers within the concept of quantum galvanochemistry.

The work found that the combination of phase diagram analysis with chemical bonding parameters is an effective tool for substantiating the composition of anti-diffusion layers and predicting their stability in thermoelectric modules. Optimization of the composition and design of contact elements contributes to increasing their thermal and mechanical stability, which confirms the functional role of barrier layers and switching structures in ensuring the durability of thermoelectric modules.

Practical significance of the obtained results

The results obtained will be used to justify the choice of the composition of effective anti-diffusion layers in manufacturing technologies, especially reliable thermoelectric modules based on bismuth telluride. The established patterns of the relationship between the parameters of chemical bonding and phase stability provide an optimized selection of coating components, taking into account their diffusion inertness, electrical conductivity and compatibility with the thermoelectric material and solder. The proposed approach to the analysis of chemical bonding parameters can be used to optimize galvanic deposition modes (electrolyte composition, concentration ratios of components, current density), which ensures the formation of structurally homogeneous and thermally stable barrier layers. This contributes to a decrease in contact electrical resistance, limitation of interphase interaction and an increase in the service life of modules in long-term and cyclic thermal modes. The results of the dissertation can be implemented in the design of multilayer metal coatings for thermoelectric energy converters with increased thermal and diffusion stability.

Keywords: semiconductor, thermoelectric materials, nanostructure, solid solutions, tellurides, n- p- types, resistance, contacts, chemical bonding, binary compounds, theoretical models, quantum laws, electron density, phase diagrams, matrix method.

Список публікацій за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Наукові праці у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у наукометричній базі даних Scopus:

1. Krechun M., Manyk O. Correlation models of anti-diffusion and connecting structures in thermoelectric energy converters. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. Seventeenth International Conference on Correlation Optics*. 2025. Vol. 13813. P. 138133O. <https://doi.org/10.1117/12.3093673> (Внесок авторів: **Кречун М. М.**: проведено розрахунки енергії дисоціації хімічних зв'язків та здійснено побудову ізотермічних перерізів і діаграм фазових областей; Маник О. М.: обговорення результатів). (Scopus).

2. Manyk O. M., Krechun M. M., Razinkov V. V. Theoretical models of anti-diffusion layers of ternary Fe–Ni–W systems in thermoelectric energy converters. *Journal of Thermoelectricity*. 2025. No. 2. P. 25-35. <https://doi.org/10.63527/1607-8829-2025-2-25-35> (Внесок авторів: **Кречун М. М.**: виконано розрахунки параметрів хімічних зв'язків у системі Fe-Ni-W; Маник О. М. та Разіньков В. В.: обговорення результатів). (Scopus).

3. Razinkov V. V., Kuz R. V., Krechun M. M. Ways to increase the resistance of thermoelectric cooling modules to mechanical impacts. *Journal of Thermoelectricity*. 2024. No. 4. P. 40-49. <https://doi.org/10.63527/1607-8829-2024-4-40-49> (Внесок авторів: **Кречун М. М.**: електрохімічне формування бандажного антидифузійного покриття та експериментальна перевірка його ефективності; Кузь Р. В.: комп'ютерне моделювання термоелементів з бандажним антидифузійним покриттям; Разіньков В. В.: обговорення результатів). (Scopus).

4. Anatychuk L. I., Lysko V. V., Zaparov S. F., Krechun M. M. Methods and equipment for the preparation of samples of thermoelectric material for measuring their properties by the absolute method. *Journal of Thermoelectricity*. 2022. No. 3-4. P. 31-42. <https://doi.org/10.63527/1607-8829-2022-3-4-31-42> (Внесок авторів: **Кречун М. М.**: технологічна підготовка зразків та електрохімічне формування контактних

структур; Анатичук Л. І.: постановка задачі дослідження, аналіз та обговорення результатів; Лисько В. В.: методологія вимірювань та аналіз похибок; Запаров С. Ф.: розробка обладнання для підготовки зразків). (Scopus).

5. Krechun M. M., Manyk O. M., Razinkov V. V. Study of Fe–W–Cr and Ni–Cr–W Systems for the Development of High-Quality Anti-Diffusion Coatings. *Journal of Thermoelectricity*. 2025. No. 4. P. 76-81. <https://doi.org/10.63527/1607-8829-2025-4-76-81> (Внесок авторів: **Кречун М. М.**: виконано розрахунки параметрів хімічних зв'язків у системі Fe–W–Cr та Ni–Cr–W; Маник О. М. та Разіньков В. В.: обговорення результатів). (Scopus).

Наукові праці у виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України та проіндексованих у наукометричних базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus:

6. Manyk O. M., Krechun M. M., Lysko V. V., Razinkov V. V. Theoretical models of ordered alloys of Bi–Sn–Te based thermoelectric materials. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2025. Vol. 26, No. 2. P. 370-376. <https://doi.org/10.15330/pcss.26.2.370-376> (Внесок авторів: **Кречун М. М.**: виконання розрахунків, аналіз результатів і їх інтерпретація з позицій технології комутації термоелементів; Маник О. М.: формування системи рівнянь для розрахунку ефективних радіусів та енергій міжатомної взаємодії, обговорення результатів; Лисько В. В.: узагальнення результатів у контексті практичного застосування для термоелектричних модулів, обговорення результатів; Разіньков В. В.: узагальнення результатів у контексті практичного застосування для термоелектричних модулів, обговорення результатів). (Web of Science, Scopus).

7. Krechun M. M. Galvanic Interconnects for Thermoelectric Cooling Modules. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2019. Vol. 20, No. 1. P. 83-88. <https://doi.org/10.15330/pcss.20.1.88>. (Web of Science, Scopus).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. Krechun M. M. Manyk O. M. Theoretical models of anti-diffusion layers and phase transitions in quaternary systems Fe–Ni–Cr–W. *XX International Freik Conference Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems*. Materials. / Ed. by L.I. Nykyruy, T. S. Potiatynnyk, M. D. Krainova, I. R. Mishchuk. (Ivano-Frankivsk, October 06-10, 2025). Ivano-Frankivsk: Publisher Vasyl Stefanyk Carpathian National University, 2025. P. 77. https://conference.pnu.edu.ua/icpttfn/wp-content/uploads/sites/10/2025/11/Abstract-book_ICPTTFN-XX_2025.pdf (Внесок авторів: **Кречун М. М.**: проведено розрахунки енергії дисоціації хімічних зв'язків та здійснено побудову ізотермічних перерізів і діаграм фазових областей; **Маник О. М.**: обговорення результатів).
2. Manyk O. M., Krechun M. M. Correlation models of anti-diffusion and connecting structures in thermoelectric energy converters. *Correlation Optics 2025*, Chernivtsi, Ukraine, September 8-12, 2025. <https://zoom.us/jb/doc/sRb3cYGvT5O7e9hacZYzSQ/p/238256191242240> (Внесок авторів: **Кречун М. М.**: проведено розрахунки енергії дисоціації хімічних зв'язків та здійснено побудову ізотермічних перерізів і діаграм фазових областей; **Маник О. М.**: обговорення результатів).
3. Кречун М. М., Маник О. М. Кореляційні моделі антидифузійних і комутаційних структур на основі Fe–Ni–Cr. *Актуальні проблеми фундаментальних наук (АПФН-2025)*: матеріали VI Міжнародної наукової конференції, присвяченої пам'яті Джордано Бруно (09-12 червня 2025 р., Луцьк – Світязь, Україна). Луцьк: Вежа-Друк, 2025. С.85-88. <http://evnuir.vnu.edu.ua/handle/123456789/28719> (Внесок авторів: **Кречун М. М.**: проведено розрахунки енергії дисоціації хімічних зв'язків та здійснено побудову ізотермічних перерізів і діаграм фазових областей; **Маник О. М.**: обговорення результатів).
4. Кречун М. М., Маник О. М. Теоретичні моделі фазової рівноваги потрійної термоелектричної системи Ві–Sn–Те. *Лашкарівські читання – 2025*: матеріали конференції молодих вчених з фізики напівпровідників з міжнародною участю (м. Київ, 3-4 квітня 2025 р.). С. 27-28.

<https://drive.google.com/file/d/1R5O7OOSuI3zTcNTqA3K0RsEhMOBSmwnV/view>

(Внесок авторів: **Кречун М. М.**: проведено розрахунки енергії дисоціації хімічних зв'язків та здійснено побудову ізотермічних перерізів і діаграм фазових областей; Маник О. М.: обговорення результатів).

5. Кречун М. М. Гальванічні комутації для термоелектричних генераторних модулів. *Лашкарівські читання – 2024*: матеріали конференції молодих вчених з фізики напівпровідників з міжнародною участю (м. Київ, 4 квітня 2024 р.). С. 85-86. https://drive.google.com/file/d/1fU15ao7F_qCoqB_hBhs37vhWnsb9n-iI/view.

6. Кречун М. М. Гальванічний метод комутації для термоелектричних модулів. *Молодіжна наука заради миру та розвитку*: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, присвяченої Всесвітньому дню науки (м. Чернівці, 9-11 листопада 2022 р.). Чернівці. 2022. С. 325-328. <https://archer.chnu.edu.ua/xmlui/handle/123456789/6979>.

Патенти на корисні моделі:

1. Багатошарова антидифузійна структура: пат. 116269 Україна: С25D3/00, С25D3/12, С25D5/00, С25D5/10. № u201612658; заявл. 12.12.2016; опубл. 10.05.2017, Бюл. № 9. Антонюк В. В., Скрипський І. М., Сліпенюк О. Т., Кречун М. М. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/359823/> (Внесок авторів: **Кречун М. М.**: участь у розробленні технології формування багатошарової антидифузійної структури, експериментальна реалізація гальванічного осадження шарів, підбір режимів нанесення та аналіз отриманих покриттів; Антонюк В. В.: формування технічної ідеї та конструктивного рішення багатошарової структури; Скрипський І. М.: участь у розробленні складів електролітів та оптимізації технологічних параметрів осадження; Сліпенюк О. Т.: експериментальна перевірка ефективності антидифузійної структури та оцінка її експлуатаційних характеристик).

2. Спосіб формування антидифузійного бар'єрного шару на комутаційних пластинах: пат. 123764 Україна: С25F3/00, H01L35/00. № u201708558; заявл. 21.08.2017; опубл. 12.03.2018, Бюл. № 5. Антонюк В. В., Скрипський І. М.,

Сліпенюк О. Т., Кречун М. М. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/689101/> (Внесок авторів: **Кречун М. М.**: участь у розробленні технології формування антидифузійного шару на комутаційних пластинах, експериментальна реалізація осадження покриттів; Антонюк В. В.: формування технічної ідеї та конструктивного рішення осадження антидифузійного бар'єрного шару на комутаційних пластинах, обговорення результатів; Скрипський І. М.: участь у розробленні складів електролітів та оптимізації технологічних параметрів осадження; Сліпенюк О. Т.: експериментальна перевірка ефективності антидифузійних шарів).

3. Спосіб травлення поверхні термоелектричного матеріалу Р-типу на основі Bi_2Te_3 : пат 132658 Україна: С25F3/00, H01L35/00. № u201808109; заявл. 23.07.2018; опубл. 11.03.2019, Бюл. № 5. Антонюк В. В., Сліпенюк О. Т., Мицканюк Н. В., Кречун М. М. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1281614/> (Внесок авторів: **Кречун М. М.**: участь у розробленні технологічних режимів травлення поверхні термоелектричного матеріалу, проведення експериментальної апробації способу; Антонюк В. В.: формування технічної ідеї способу травлення та визначення основних технологічних принципів його реалізації; Сліпенюк О. Т.: підбір складу травильного розчину та оптимізація технологічних параметрів процесу; Мицканюк Н. В.: експериментальна перевірка відтворюваності способу та оцінка його ефективності щодо підвищення адгезії контактних шарів).

4. Спосіб осадження бар'єрного антидифузійного покриття на поверхню термоелектричного матеріалу BiTe (Р-тип): пат. 142968 Україна: С25D5/00, H01L35/00; № u201911324; заявл. 21.11.2019; опубл. 10.07.2020, Бюл. № 13. Антонюк В. В., Сліпенюк О. Т., Кречун М. М. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1442870/> (Внесок авторів: **Кречун М. М.**: розробка та експериментальна реалізація режимів осадження бар'єрного антидифузійного покриття; Антонюк В. В.: формування технічної ідеї та конструктивного рішення осадження антидифузійного бар'єрного покриття, обговорення результатів; Сліпенюк О. Т.: оптимізація складу електроліту та технологічних параметрів процесу).