

Облікова картка дисертації

I. Загальні відомості

Державний обліковий номер: 0826U001929

Особливі позначки: відкрита

Дата реєстрації: 25-05-2026

Статус: Захищена

Реквізити наказу МОН / наказу закладу:



II. Відомості про здобувача

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Шульга Дмитро Олександрович

2. Dmytro O. Shulha

Кваліфікація:

Ідентифікатор ORCID ID: Не застосовується

Вид дисертації: доктор філософії

Аспірантура/Докторантура: так

Шифр наукової спеціальності: 105

Назва наукової спеціальності: Прикладна фізика та наноматеріали

Галузь / галузі знань:

Освітньо-наукова програма зі спеціальності: Прикладна фізика та наноматеріали

Дата захисту: 03-07-2026

Спеціальність за освітою: Фізика та астрономія

Місце роботи здобувача: Національний університет "Львівська політехніка"

Код за ЄДРПОУ: 02071010

Місцезнаходження: вул. Степана Бандери, Львів, 79013, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

III. Відомості про організацію, де відбувся захист

Шифр спеціалізованої вченої ради (разової спеціалізованої вченої ради): PhD 13694

Повне найменування юридичної особи: Національний університет "Львівська політехніка"

Код за ЄДРПОУ: 02071010

Місцезнаходження: вул. Степана Бандери, Львів, 79013, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

IV. Відомості про підприємство, установу, організацію, в якій було виконано дисертацію

Повне найменування юридичної особи: Національний університет "Львівська політехніка"

Код за ЄДРПОУ: 02071010

Місцезнаходження: вул. Степана Бандери, Львів, 79013, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

V. Відомості про дисертацію

Мова дисертації: Українська

Коди тематичних рубрик: 29, 29.31

Тема дисертації:

1. Нелінійно-оптичні взаємодії та їхня просторова анізотропія в кристалічних матеріалах та нанокompозитах
2. Nonlinear optical interactions and their spatial anisotropy in crystalline materials and nanocomposites

Реферат/анотація:

1. Дана дисертація присвячена задачі збільшення ефективності пристроїв нелінійної оптики як на основі оптимізації характеристик відомих матеріалів, так і за рахунок створення нових нелінійно-оптичних матеріалів на основі нанокompозитів. Обґрунтування актуальності теми дослідження, його мету, основні завдання, наукову новизну і практичну цінність дисертації висвітлено у вступі. У першому розділі дисертації представлено огляд літературних джерел щодо фізики нелінійно-оптичних процесів – генерації другої гармоніки, сумарної та різницевої частот, параметричної генерації, варіанти їх застосування у оптичних пристроях. Розглянуто питання щодо умов фазового синхронізму як скалярного, так і векторного, реалізація яких дозволяє збільшити величину спостережуваних нелінійно-оптичних ефектів. Представлено огляд з питань фізики нанокompозитів, описано застосований метод виготовлення та способи використання у оптоелектроніці та фотоніці. Також представлено огляд з питань фізики нанокompозитів, описано метод їх виготовлення та можливості застосування у фотоніці та оптоелектроніці. У другому розділі описано метод, який застосовується в роботі для розв'язання задачі оптимізації геометрії нелінійно-оптичних взаємодій у

кристалічних матеріалах у загальному випадку неколінеарності взаємодіючих променів (векторного фазового синхронізму). Метод базується на побудові та аналізі властивостей екстремальних поверхонь, які відображають максимально досяжні значення ефективності для всіх можливих напрямків вихідного (згенерованого) променя. Представлено опис кристалів ромбічної та моноклінної сингоній, для яких і проводилося дослідження. Надано опис спеціального програмного забезпечення, розробленого для проведення розрахунків. Наведено дані щодо технології виготовлення нанокompatитів, які являють собою нанокристали $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ (ADP), розташовані в порах наноматриці Al_2O_3 (AAO), а також опис експериментальної установки, на якій проводилися дослідження. У третьому розділі представлено результати визначення максимально досяжних значень ефективності генерації другої гармоніки, сумарної та різницевої частот у ряді двовісних нелінійно-оптичних кристалів ромбічної сингонії – KTP, KTA, KB5, KNbO₃, LBO, CBO, LRB4. Визначено оптимальні геометрії векторного фазового синхронізму, тобто такі напрямки хвильових векторів вхідних та вихідного променів, що забезпечують найбільші досяжні значення ефективності нелінійних процесів. Показано, що для значної кількості випадків векторний фазовий синхронізм забезпечує вищу ефективність, ніж скалярний. Зокрема, це має місце для генерації другої гармоніки (фазовий синхронізм типу I або ssf) у KB5 (відносне збільшення ефективності становить 145%), KTP (49%), KNbO₃ (39%) та KTA (17%). У четвертому розділі представлено результати із оптимізації геометрії нелінійно-оптичних взаємодій для моноклінних нелінійних оптичних кристалів GdCOB, YCOB, BiBO, LCB. Показано, що для цих матеріалів збільшення ефективності, спричинене використанням векторного фазового синхронізму, не перевищує десятків відсотків по відношенню до скалярного випадку. Максимальне значення відносного збільшення ефективності становить близько 53% для кристала BiBO у випадку генерації різницевої частоти. Найвищі абсолютні значення ефективності також мають місце для кристала BiBO; тоді як найнижчі – для LCB. У п'ятому розділі представлено результати досліджень нанокompatитного нелінійно-оптичного матеріалу, отриманого введенням нанокристалітів $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ (ADP) у нанопори анодованого оксиду алюмінію (AAO). Експериментальні дослідження за методом смужок Мейкера виявили сильний нелінійний відгук третього порядку, тоді як генерація другої гармоніки була відсутня, ймовірно, через невідповідність фаз і шорсткість поверхні. Теоретичне моделювання з використанням порівняльної моделі та моделі Рейнтгеса дозволило визначити величину нелінійної оптичної сприйнятливості третього порядку для досліджених зразків. Дослідження виявило також ключову роль розміру нанопор у впливі на ефективність генерації третьої гармоніки.

2. This dissertation is devoted to the task of increasing the efficiency of nonlinear optical devices by optimizing the characteristics of known materials and by creating new nonlinear optical materials based on nanocomposites. Justification of the relevance of the chosen topic of the dissertation research, the purpose of the research, the main tasks, scientific novelty and practical value of the work are highlighted in the introduction. The first chapter of the dissertation presents a review of literature sources on the physics of nonlinear optical processes – generation of the second harmonic, sum and difference frequencies, parametric generation, as well as the variants of their application in optical devices. The issues of the conditions of phase matching, both scalar and vector, the implementation of which allows to increase the magnitude of the observed nonlinear optical effects are considered. A review of the physics of nanocomposites is presented, a method for manufacturing nanocomposites, their use in optoelectronics and photonics is described. The second chapter describes the method used in the work to solve the problem of optimizing the geometry of nonlinear optical interactions in crystalline materials in the general case of non-collinearity of interacting beams (vector phase matching). The method is based on the construction and analysis of the properties of extreme surfaces, which reflect the maximum achievable efficiency values for all possible directions of the output (generated) beam. A description of the crystals of the orthorhombic and monoclinic systems, for which the study is conducted, is presented. A description of the special software developed for calculations is provided. Data on the technology for manufacturing nanocomposites, which are $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ nanocrystals (ADP) located in the pores of the Al_2O_3 (AAO) nanomatrix, as well as a description of the experimental setup on which the study was carried out, are presented. The third chapter presents the results of determining the maximum achievable values of the generation efficiency of the second harmonic, sum and

difference frequencies in a number of biaxial nonlinear optical crystals of the rhombic system - KTP, KTA, KB5, KNbO₃, LBO, CBO, LRB4. The optimal geometries of vector phase matching are determined, i.e. such directions of the wave vectors of the input and output beams that provide the highest achievable values of the efficiency of nonlinear processes. It is shown that for a significant number of cases, vector phase matching ensures higher efficiency than the scalar one. In particular, for the case of second harmonic generation (type I or ssf phase matching) in KB5 (the relative efficiency increase is 145%), KTP (49%), KNbO₃ (39%) and KTA (17%). The fourth chapter presents the results of the optimization of the geometry of nonlinear optical interactions for monoclinic nonlinear optical crystals GdCOB, YCOB, BiBO, LCB. It is shown that for these materials the efficiency increase caused by the use of vector phase matching does not exceed tens of percents with respect to the scalar case. The maximum value of the relative efficiency increase is about 53% for the BiBO crystal in the case of difference frequency generation. The highest absolute efficiency values also occur for the BiBO crystal, while the lowest ones are for LCB. The fifth chapter presents the results of studies of a nanocomposite nonlinear optical material AAO:ADP obtained by introducing NH₄H₂PO₄ nanocrystallites into the nanopores of anodized aluminum oxide. Experimental studies using the Maker fringes method revealed a strong third-order nonlinear response, while second-harmonic generation was absent, probably due to phase mismatch and surface roughness. Theoretical modeling using the comparative model and the Reintjes model allowed to determine the value of the third-order nonlinear optical susceptibility for the studied samples. The study also revealed the key role of nanopore size in influencing the efficiency of third-harmonic generation.

Державний реєстраційний номер ДіР:

Пріоритетний напрям розвитку науки і техніки: Нові речовини і матеріали

Стратегічний пріоритетний напрям інноваційної діяльності: Освоєння нових технологій виробництва матеріалів, їх оброблення і з'єднання, створення індустрії наноматеріалів та нанотехнологій

Підсумки дослідження: Новий напрямок у науці і техніці

Публікації:

1. Buryy O., Shulha D., Andrushchak N., Danylov A., Bouchta S., Andrushchak A. Optimal vector phase-matching conditions in biaxial crystalline materials determined by the extreme surface method: the case of orthorhombic crystals. *Appl. Opt.*, 2024, 63(13), 3725-3735. <https://doi.org/10.1364/AO.518690>.
2. Guichaoua D., Alnusirat W., Adamiv V., Andrushchak N., Teslyuk I., Shulha D., Andrushchak A., Gnilitzkyi I., Sahraoui B. Nonlinear optical properties of some nanosized ammonium dihydrogen phosphate crystals incorporated in aluminum oxide nanopores. *AIP Advances*, 2024, 14, 115314. <https://doi.org/10.1063/5.0231179>.
3. Shulha D., Buryy O., Andrushchak N., Kohut Z., Sahraoui B., Andrushchak A. The optimal vector phase matching conditions in biaxial crystalline materials determined by the extreme surface method: the case of monoclinic crystals. *Ukr. J. Phys. Opt.*, 2025, 26(4), 04095-04108. <https://doi.org/10.3116/16091833/Ukr.J.Phys.Opt.2025.04095>.
4. Балук В.І., Бендак А.В., Шульга Д.О., Андрущак А.С. «Спосіб рентгеноструктурних досліджень заповнених кристалітами пористих кремнієвих мембран». Патент України на корисну модель №1558811. Опубліковано від 17.04.2024 р., Бюл. №16/2024. Заявка №u202303501 зареєстрована 18.07.2023 р. в СІС УКРНОІВІ.
5. Buryy O., Shulha D., Andrushchak A. Determination of Optimal Conditions of Second Harmonic, Sum and Difference Frequency Generation in Crystalline Materials by Extreme Surfaces Method. *Book of abstracts 2nd International Conference on Innovative Materials and NanoEngineering (IMNE'2022)*, Листопад 11-13, 2022, Довголука, Україна, Р. 2-5.
6. Buryy O., Andrushchak A., Shulha D. Vector phase matching in orthorhombic biaxial crystals by extreme surface method. *Book of abstracts 3rd International Conference on Innovative Materials and*

NanoEngineering (IMNE'2023), Листопад 10-13, 2023, Довголука, Україна, Р.2-13.

- 7. Taboukhat S., Aamoum A., Shulha D., Guichaoua D., Wielgosz R., Andrushchak A., Sahraoui B. Investigating the relationship between molecular structure and nonlinear optical behavior in specific organic and organometallic compounds. [Електронний ресурс] 24th International conference on transparent optical networks, ICTON 2024 (Bari, Italy, 14-18 July 2024), 2024.
- 8. Andrushchak A., Ouedghiri-Idrissi I., Sofiani Z., Talbi A., El K.Y., Guichaoua D., Shulha D., Wielgosz R., Płóciennik P., Taboukhat S., Zawadska A., Sahraoui B. Photophysical study of 2,3-Diphenyl Quinoxaline thin films for potential applications in optoelectronic devices [Електронний ресурс] 24th International conference on transparent optical networks, ICTON 2024 (Bari, Italy, 14-18 July 2024), 2024.
- 9. Andrushchak A., Shulga D., Buryy O., Sahraoui B. Determination of optimal conditions of non-linear optical interactions in monoclinic crystals. 25th jubilee annual conference on material science YUCOMAT 2024 & Thirteenth world round table conference on sintering XIII WRTCS 2024: program and book of abstracts (Herceg Novi, Montenegro, September 2-6, 2024), 2024, P. 106.
- 10. Shulha D., Buryy O., Adamiv V., Andrushchak A. The photonic zone structures of arrays of KDP nanorods. International workshop for young scientists «Functional materials for technical and biomedical applications» (Львів, Україна, Жовтень 14-16, 2025), 2025, P. 8.

Наукова (науково-технічна) продукція:

Соціально-економічна спрямованість:

Охоронні документи на ОПІВ:

Винаходи, корисні моделі, промислові зразки

Балук В.І., Бендак А.В., Шульга Д.О., Андрущак А.С. «Спосіб рентгеноструктурних досліджень заповнених кристалітами пористих кремнієвих мембран». Патент України на корисну модель №1558811.

Опубліковано від 17.04.2024 р., Бюл. №16/2024. Заявка №u202303501 зареєстрована 18.07.2023 р. в СІС УКРНОІВІ.

Впровадження результатів дисертації: Планується до впровадження

Зв'язок з науковими темами:

VI. Відомості про наукового керівника/керівників (консультанта)

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Андрущак Анатолій Степанович

2. Anatoliy S. Andrushchak

Кваліфікація: д. т. н., професор, 01.04.07

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0002-8611-3027

Додаткова інформація:

Повне найменування юридичної особи: Національний університет "Львівська політехніка"

Код за ЄДРПОУ: 02071010

Місцезнаходження: вул. Степана Бандери, Львів, 79013, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

VII. Відомості про офіційних опонентів та рецензентів

Офіційні опоненти

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Стадник Василь Йосифович
2. Vasyl Y. Stadnyk

Кваліфікація: д. ф.-м. н., професор, 01.04.10

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0001-7820-7886

Додаткова інформація: Scopus Author ID: 35615288600; Web of Science Researcher ID: E-4578-2019;
<https://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&user=82Ak5jsAAAAJ>

Повне найменування юридичної особи: Львівський національний університет імені Івана Франка

Код за ЄДРПОУ: 02070987

Місцезнаходження: вул. Університетська, Львів, 79000, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Ціж Богдан Романович
2. Bohdan R. Tsizh

Кваліфікація: д.т.н., професор, 05.27.06

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0002-1319-1016

Додаткова інформація:

Повне найменування юридичної особи: Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького

Код за ЄДРПОУ: 00492990

Місцезнаходження: вул. Пекарська, Львів, 79010, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

Рецензенти

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Фітьо Володимир Михайлович
2. Volodymyr M. Fityo

Кваліфікація: д. ф.-м. н., професор, 01.04.05

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0001-6086-4087

Додаткова інформація:

Повне найменування юридичної особи: Національний університет "Львівська політехніка"

Код за ЄДРПОУ: 02071010

Місцезнаходження: вул. Степана Бандери, Львів, 79013, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Стахіра Павло Йосипович

2. Pavlo Y. Stakhira

Кваліфікація: д. т. н., професор, 05.27.06

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0001-5210-415X

Додаткова інформація: Scopus Author ID: 9334821400; Web of Science Researcher ID: F-7270-2012;
<https://scholar.google.com.ua/citations?user=nBrTX2MAAAAJ>

Повне найменування юридичної особи: Національний університет "Львівська політехніка"

Код за ЄДРПОУ: 02071010

Місцезнаходження: вул. Степана Бандери, Львів, 79013, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

VIII. Заклучні відомості

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові
голови ради**

Яремчук Ірина Ярославівна

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові
головуючого на засіданні**

Яремчук Ірина Ярославівна

**Відповідальний за підготовку
облікових документів**

Матулка Дарія Василівна

Реєстратор

Юрченко Тетяна Анатоліївна

**Керівник відділу УкрІНТЕІ, що є
відповідальним за реєстрацію наукової
діяльності**



Юрченко Тетяна Анатоліївна