

Резонансні і сенсорні характеристики об'ємних хвилеводних структур на основі полімерних наноматеріалів

Гринь В. О., Єжов П. В., Смірнова Т. М.

XLVI Підсумкова наукова конференція

Київ, 09–10 лютого 2021 р.

Актуальність. Використання фотополімерних нанокомпозитів відкриває можливість швидкого і прецизійного виготовлення резонансних періодичних структур, які можуть бути використані в якості чутливих елементів датчиків для виявлення малих кількостей токсичних біохімічних речовин та забруднювачів навколишнього середовища. Дослідження, спрямовані на захист навколишнього середовища та здоров'я людей, є найбільш пріоритетними в сучасних умовах.

Метою цієї роботи є дослідження резонансних хвилеводних структур на основі нанокомпозитів для їх використання у якості сенсорів.

У цій роботі ми **вперше** розглядаємо використання нанокомпозитів для виготовлення резонансних структур.

Основною задачею було виготовлення світлочутливих шарів для запису хвилеводних резонансних структур, запис цих структур і їх дослідження.

Вперше створено і досліджено резонансні хвилеводні структури на основі голографічної об'ємної ґратки-хвилеводу, утвореної періодичною модуляцією показника заломлення (ПЗ) нанокомпозиту. У всіх попередніх дослідженнях вивчалися структури на основі рельєфних ґраток, виготовлених методами літографії та тиснення. Завдяки цьому нам вдалося суттєво звузити ширину резонансної смуги, зменшити межу детектування та здешевити метод виготовлення.

Використання нанокомпозитів

Фоточутливі нанокомпозити є самообробними матеріалами, які утворюють наноструктури полімер—наночастинки завдяки **процесу фотополімеризації**. Використання фотополімерних нанокомпозитів дозволяє виготовляти одно-, дво- і тривимірні періодичні структури великих розмірів та високої однорідності **одностадійним методом голографічної літографії**.

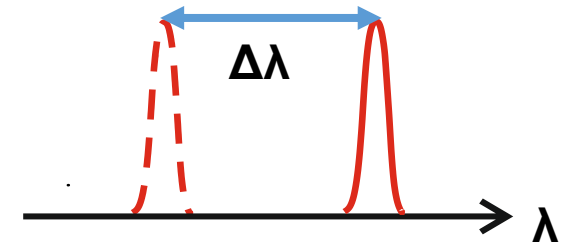
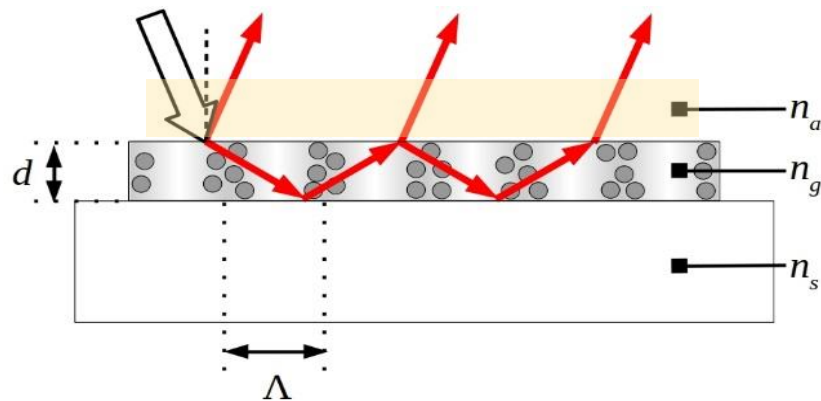
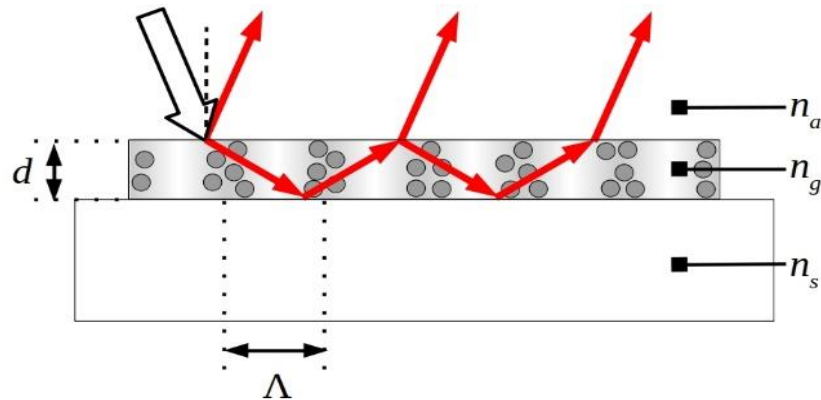
Області застосування:

- голографічні дифракційні елементи для світлової та нейтронної оптики;
- періодичні структури для лазерів з розподіленим зворотним зв'язком;
- голографічні біохімічні сенсори, принцип дії яких заснований на зміні параметрів ґратки під дією зовнішнього середовища.

Tomita, Y.; Hata, E.; Momose, K.; et al. Photopolymerizable nanocomposite photonic materials and their holographic applications in light and neutron optics. *J. Mod. Opt.* **2016**, 63, S1–S31, doi: 10.1080/09500340.2016.1143534.

Ми запропонували нове застосування фотополімерних нанокомпозитів для розробки резонансних хвилеводних структур, принцип роботи яких заснований на хвилеводному резонансі в діелектричній ґратці, розміщеній на діелектричній підкладці.

Резонансні хвиеводні структури



Резонансні максимуми
у спектрах відбивання

У цій роботі ми досліджуємо сенсор, який вимірює зсув резонансного піку, викликаний зміною показника заломлення досліджуваної речовини.

Межа детектування (мінімальна зміна показника заломлення $\Delta n_{\min}$) визначається мінімальною величиною $\Delta \lambda$, яку можна виміряти.

Підґрунтя досліджень

Основним типом резонансних структур, які на сьогоднішній день мають практичне застосування, є **рельєфні хвилеводні структури**, виготовлені методами УФ або електронно-променевої літографії, наноімпринтунгу, гарячого тиснення, іонного травлення тощо, які досить дорогі, часом багатоступеневі з використанням хімічної обробки і не забезпечують високої однорідності ґратки на великій площині. «Помилки виготовлення» спричиняють збільшення спектральної напівширини резонансних піків.

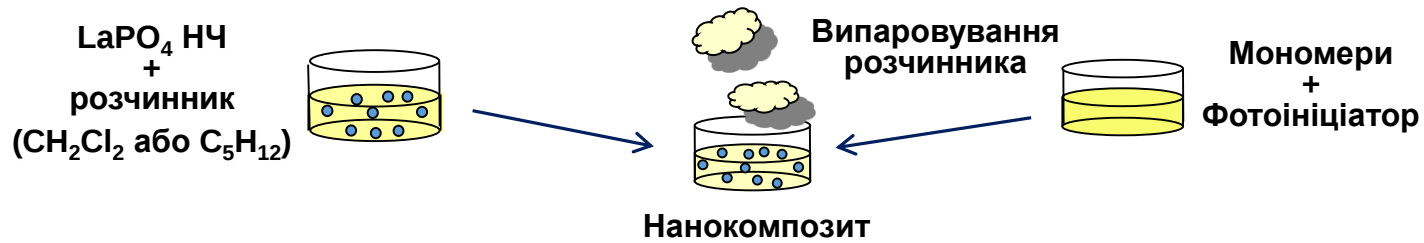
Чутливість сенсора ПЗ визначається мінімальною зареєстрованою зміною спектрального положення резонансного піку і, відповідно, залежить від напівширини цього піку.

Запропонована конструкція діелектричного сенсора ПЗ на основі **простої 1D рельєфної ґратки** забезпечує **ширину смуги резонансних піків до 0,02 нм**.

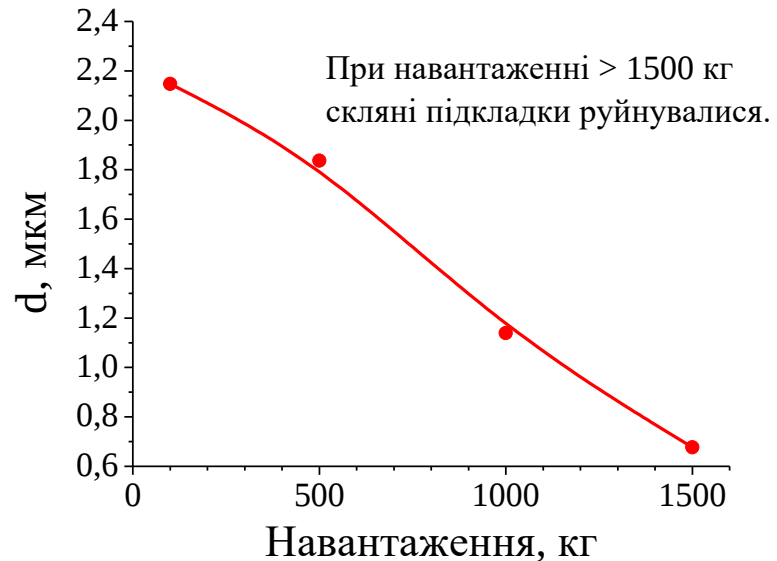
Нанокмпозитні ґратки-хвилеводи з об'ємною модуляцією діелектричної сприйнятливості, виготовлені методом голографічної літографії, позбавлені від «помилки виготовлення». Згідно із нашими теоретичними оцінками, **ширина смуги оцінюється приблизно 0,002 нм**.

Висока просторова однорідність і вузькі резонансні смуги об'ємних ґраток-хвилеводів, виготовлених методом голографічної літографії, стали підґрунтям для дослідження можливості використання ґраток-хвилеводів на основі нанокмпозитів у якості сенсорів.

Виготовлення фоточутливих шарів



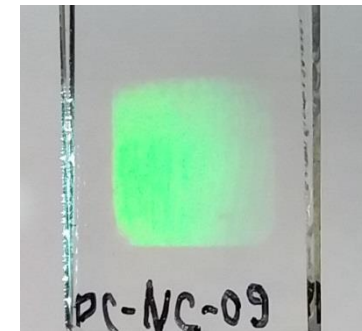
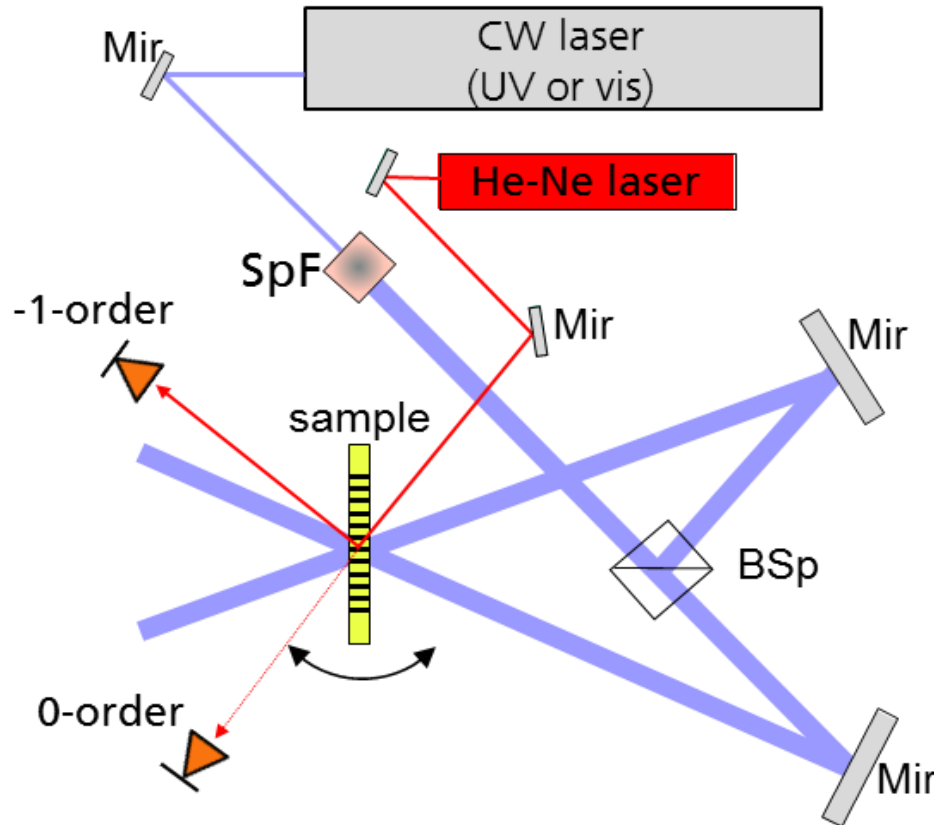
Фоточутливий шар під пресом



Залежність товщини полімерного шару від навантаження

Розроблено метод стиснення наноккомпозиту для формування фоточутливих шарів товщиною 0,7–2 мкм і високою якістю поверхні.

Голографічний запис ґраток-хвильоводів



Фотографія ґратки-хвильоводу товщиною 1,3 мкм

Схематичне зображення голографічної установки:
SpF- просторовий фільтр і блок телескопа, Mir – дзеркала,
BSp – світлоподільний кубик

**Оптимізація умов запису дозволяє отримати ФК-структури товщиною 1,2-1,7 мкм,
і амплітудою модуляції показника заломлення 0,010–0,017.**

Схема експерименту

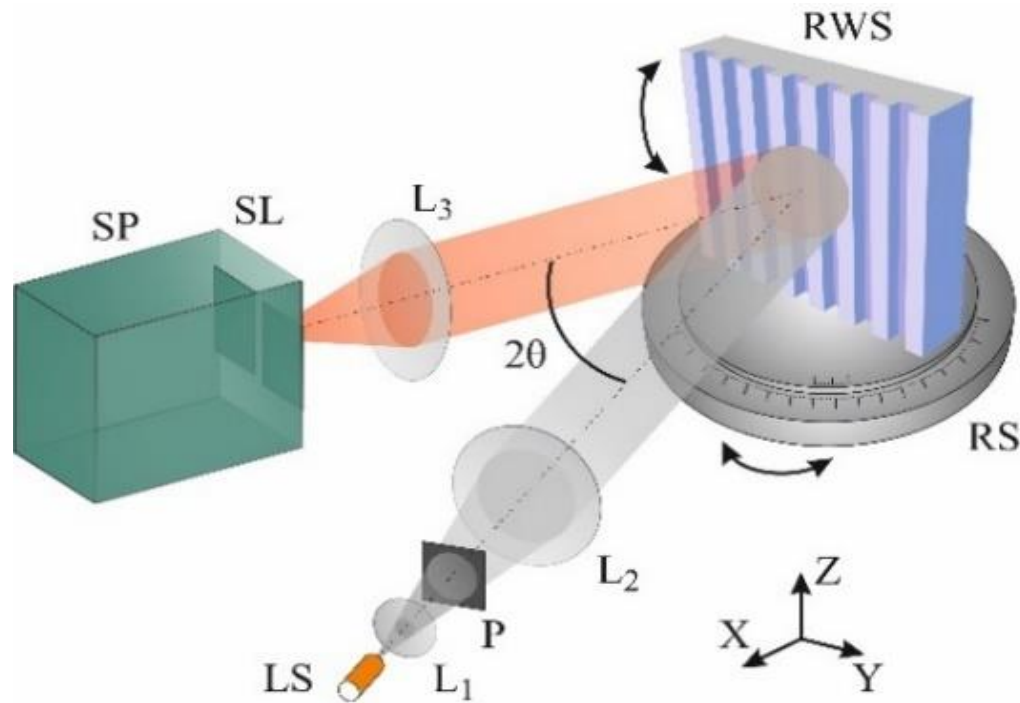


Схема установки для дослідження спектрів відбивання від ґраток-хвильоводів

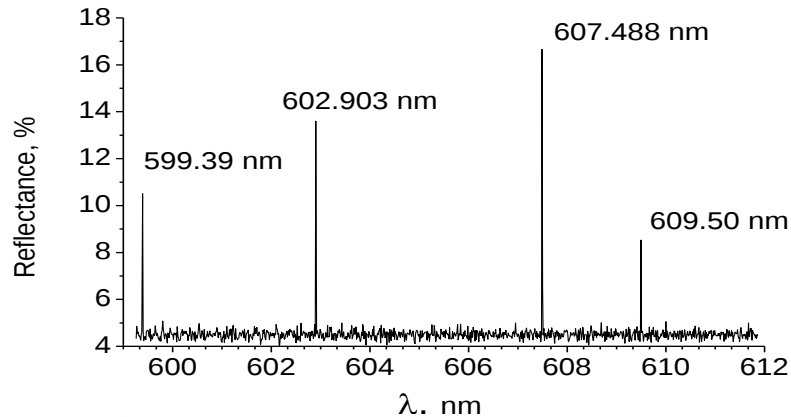
LS – джерело світла; L₁, L₂, L₃ – лінзи; P – поляризатор; RS – поворотна платформа;

RWS – резонансна хвильоводна структура; SL – вхідна щілина спектрометра;

SP – спектрометр Acton SpectraPro 2500i; 2θ – кут між падаючим і відбитим променем.

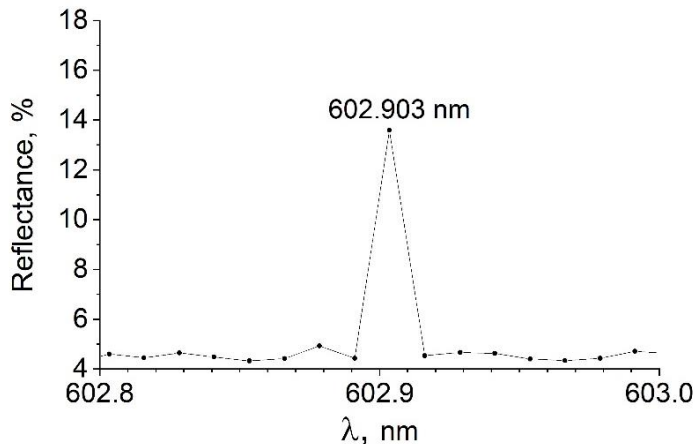
Резонансні властивості ґраток-хвильоводів

Параметри резонансних структур: $\Lambda = 399$ нм, $d = 1,3$ мкм, $n_1 = 0,017$



Спектр відбивання для кута падіння 0.25° .

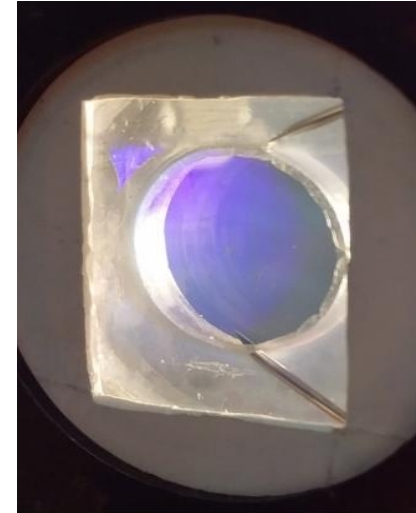
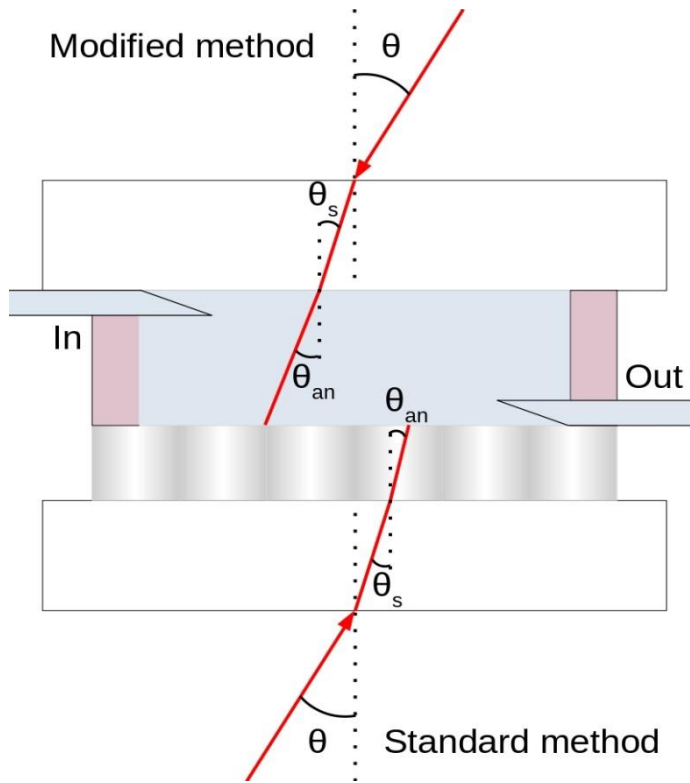
Довжини хвиль максимумів для кута падіння 10° складають 674.461 і 536.556 нм.



Ділянка спектру в області короткохвильової смуги.

Напівширина резонансного піка у спектрі відбивання складає 0,012 нм і обмежується роздільною здатністю спектрального приладу.
Q-фактор $(\lambda/\lambda_{0,5}) > 50\,000$.

Сенсор зміни показника заломлення



Фотографія кювети

Конструкція кювети та хід променів у ній

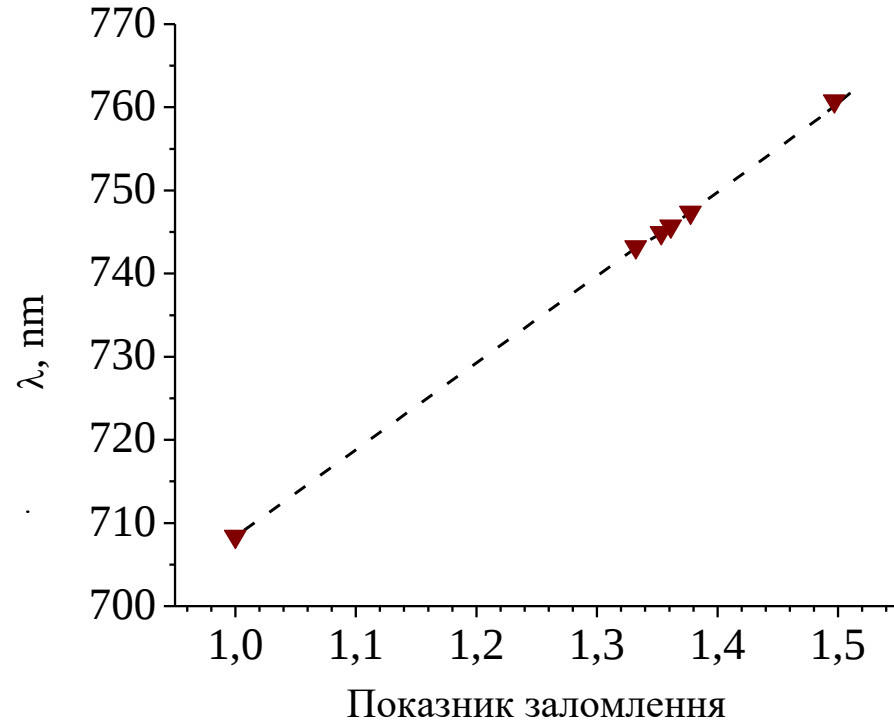
Стандартний метод: $\theta = \text{const}$, θ_{an} змінюється для різних речовин.

Модифікований метод: $\theta_{an} = \text{const}$, θ змінюється для різних речовин.

Характеристики сенсора

Показники заломлення досліджуваних речовин.

Речовина	Показник заломлення, n_a
Вода	1,3321
60% водний розчин етанолу	1,3532
Етанол	1,3611
Ізопропанол	1,3776
Толуен	1,4970



Експериментально визначені положення резонансних піків у спектрі (трикутні маркери), отримані для кута в рідині $\theta_{an} = 15^\circ$.

Модифікований метод забезпечує чутливість сенсора $\Delta\lambda/\Delta n = 122 \text{ nm/RIU}$ і мінімальну зміну показника заломлення $\Delta n_{\min} \approx 1 \times 10^{-4} \text{ RIU}$.
(теоретична межа детектування $\Delta n_{\min} \approx 10^{-5} \text{ RIU}$).

Отримані значення $\Delta n_{\min}$, $\Delta\lambda_{0.5}$ і Q перевищують досягнуті для сенсорів на базі 1D рельєфних структур.

Висновки

Встановлено, що виготовлені на основі нанокомпозитів структури можуть бути використані у якості датчиків зміни ПЗ.

Згідно з теоретичними оцінками, їх характеристики можуть бути суттєво покращені завдяки:

- (i) нанесенню шару з високим значенням ПЗ (наприклад, графену або TiO_2) на поверхню ґратки;**
- (ii) використанню для вимірювань ТМ-поляризованого світла, для якого ширина резонансної кривої на два порядки менша, ніж для ТЕ-поляризованого світла;**
- (iii) збільшенню амплітуд модуляції ПЗ ґратки шляхом введення у нанокомпозит наночастинок із вищим значенням ПЗ або наночастинок благородних металів.**

Одержані результати мають також фундаментальне значення для поглиблення розуміння взаємодії світла з резонансними структурами.

Публікації за темою дослідження

- Smirnova, T.; Fitio, V.; Sakhno, O.; Yezhov, P.; Bendziak, A.; Hryn, V.; Bellucci, S. Resonant and sensing performance of volume waveguide structures based on polymer nanomaterials. *Nanomaterials* (2020) **10**, pp. 2114:1–2114:22. DOI: 10.3390/nano10112114. (Quartile 1)
- Smirnova, T.; Yezhov, P.; Hryn, V.; Sakhno, O.; Fito, V.; Bendziak, A. Based on nanocomposite resonant photonic crystal structures for sensing applications. In: *Advanced Technologies for Security Applications. NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics*. Springer: Dordrecht, The Netherlands (2020), pp. 219–228. DOI: 10.1007/978-94-024-2021-0_20.
- Hryn, V.; Sakhno, O.; Bendziak, A.; Fito, V.; Yezhov, P.; Smirnova, T. Development of the waveguide photonic crystal structures formed by distribution of nanoparticles in polymer matrix. In: *Springer Proceedings in Physics*. Springer: Cham, Switzerland (2019) **222**, pp. 73–85. DOI: 10.1007/978-3-030-17755-3_4.

Робота виконана за підтримки

багаторічної програми НАТО „Наука заради миру і безпеки“ – Проект SPS G5351
„Фотонно-кристалічні сенсори біологічних і хімічних з’єднань на основі
нанокомпозитів“,
та Цільової комплексної програми фундаментальних досліджень НАН України
„Лазерна інженерія нанооб’єктів: фізичні основи і застосування“.

Дякую за увагу!

