

ОПТИЧНІ ХВИЛЕВОДИ У ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ

Василь Шлапа¹, Аліна Третяк¹, Сергій Федосов^{1,2}

OPTICAL WAVEGUIDES IN INFORMATION TRANSMISSION

Vasyl Shlapa¹, Alina Tretiak¹, Serhii Fedosov^{1,2}

¹Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, Луцьк, 43025, Україна

²Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, 43018, Україна

Abstract. *The article presents a comprehensive analysis of the most relevant engineering and technological solutions in the field of waveguide design, integration with light sources and receivers, nonlinear optics and modulation. The materials have applied significance for the development of photonics, telecommunications, sensors, spectroscopy, quantum computing and miniature optoelectronic systems of the new generation.*

Оптичні хвилеводи – це фізичні структури, які направляють світло вздовж певної траєкторії за рахунок повного внутрішнього відбиття або інших механізмів утримання світла. Основними типами оптичних хвилеводів є волоконно-оптичні хвилеводи (оптичні волокна), планарні хвилеводи (плівкові), кремнієві фотонні хвилеводи, гребінцеві (ребристі) хвилеводи тощо. Серед найважливіших характеристик хвилеводів є число мод (одномодові, багатомодові хвилеводи), втрати (через поглинання, розсіювання, нерівності), дисперсія – залежність швидкості поширення хвилі від частоти, гнучкість дизайну – важлива для фотонних інтегральних схем.

Оптичні хвилеводи мають широке прикладне значення. Їх використовують як: волоконно-оптичні лінії зв'язку, пасивні оптичні мережі; модулятори, фільтри, лазери, демультиплексори; ендоскопи, лазерна хірургія, біофотоніка; виявлення хімічних речовин, температури, тиску; передача та обробка квантової інформації; інтегровані джерела, фазові масиви. Тому серед сучасних напрямів досліджень важливими є нелінійні хвилеводи – для генерації нових частот (оптичні гребінці); хвилеводи на 2D-матеріалах (графен, MoS₂) – для інтеграції з електронікою; топологічні хвилеводи – світло, нечутливе до дефектів, як у топологічних ізоляторах; фотонні кристали – для контролю поширення світла за допомогою періодичних структур.

У наукових статтях відображено сучасні тенденції у проектуванні та застосуванні оптичних хвилеводів як ключових елементів фотоніки нового покоління. Основну увагу приділено інноваційним рішенням у створенні інтегрованих оптичних систем, які працюють у середньому інфрачервоному, видимому та телекомунікаційному діапазонах. Генерація суперконтинууму є ключовим процесом у сучасній фотоніці, який забезпечує надширокий спектр випромінювання шляхом перетворення ультракоротких лазерних імпульсів через нелінійні оптичні ефекти. Одним із центральних напрямів є суперконтинуум-генерація (SCG) в діелектричних хвилеводах на базі матеріалів GaAsSb/InP та GaN-on-sapphire, яка забезпечує надшироке спектральне охоплення при рекордно низькій потужності накачування [1]. Ці досягнення відкривають перспективи реалізації компактних спектроскопічних систем, що працюють у режимі реального часу та інтегруються на одному чіпі.

Методи 3D-візуалізації сприяють створенню інтелектуальних систем для автономних транспортних засобів. Оптичні фазовані решітки (OPA), що використовуються в усіх твердотільних конфігураціях, стають перспективним рішенням для 3D-візуалізації. Однак

більшість сучасних ОРА зазвичай страждають від значного падіння потужності на краю поля зору (FOV), що призводить до обмеженого ефективного FOV та погіршення якості 3D-зображення. Тому інший важливий аспект охоплює ОРА, які демонструють здатність до формування складних просторових діаграм променя, широкого поля зору до 180° і високого придушення бічних пелюсток. Унікальність запропонованого підходу [2] полягає в тому, що замість усунення перехресних перешкод, система компенсує їх шляхом попередньої оптимізації фазових і амплітудних характеристик сигналу. Це відкриває нові можливості для створення адаптивних сенсорів, LiDAR-систем і засобів бездротового оптичного зв'язку.

Особливий інтерес викликають поляритонні лазери, здатні працювати за кімнатної температури. В останні роки значна увага приділяється їх реалізації в оптичних хвилеводах на основі матеріалів із великою шириною забороненої зони, таких як GaN і ZnO. Окрему увагу приділено поляритонним хвилеводним лазерам [3], які об'єднують в собі властивості світла і матерії, демонструючи режим синхронізації мод на частоті 300 ГГц і імпульси тривалістю ~ 100 фс при кімнатній температурі. В основі лежить хвилевідна структура на основі GaN із інтегрованим брегівським резонатором. Такі пристрої мають надзвичайно високий потенціал для створення джерел когерентного УФ-випромінювання в нанофотонних системах.

Оптомеханічні кристали (ОМС) слугують когерентним інтерфейсом між оптичними фотонами та акустичними фононами, що робить їх ключовими компонентами в оптичних квантових перетворювачах мікрохвильового діапазону. Такі пристрої є перспективними для створення каналів зв'язку з низькими втратами між надпровідними квантовими процесорами, що працюють на гігагерцових частотах. Крім того, завдяки ОМС стало можливим когерентне керування та маршрутизація фононів на рівні мікросхем, що дозволило продемонструвати явища, як-от невзаємна передача світла й топологічно захищений транспорт фононів. У [4] автори розглядають ОМС, у яких досягнуто селективне постфабрикаційне налаштування як оптичних, так і акустичних резонансів за допомогою атомно-силового мікроскопа (AFM) шляхом локального електропольового наоокислення. Така технологія дозволяє досягати точного узгодження частот між елементами резонаторних масивів, що особливо важливо для квантових інтерфейсів між мікрохвильовими й оптичними сигналами, а також для створення масштабованих фотонно-акустичних інтегральних схем.

Дослідження [5], присвячено оптоелектромеханічним модуляторам у скляних структурах, зокрема в інтерферометрах Маха-Цендера, реалізованих методом фемтосекундної лазерної мікрообробки. Застосування еластооптичного ефекту дозволяє здійснювати швидке фазове та амплітудне керування оптичними сигналами на мегагерцових частотах при збереженні низьких втрат – критичний фактор для високошвидкісних комунікаційних систем.

У статтях висвітлено найактуальніші інженерні і технологічні рішення у сфері проєктування хвилеводів, інтеграції з джерелами та приймачами світла, нелінійної оптики та модуляції. Матеріали мають прикладне значення для розвитку фотоніки, телекомунікацій, сенсорики, спектроскопії, квантових обчислень і мініатюрних оптоелектронних систем нового покоління.

Бібліографія

1. Fan W., Ludwig M., Rousseau I. [et al.]. Supercontinua from integrated gallium nitride waveguides. *Optica*. 2024. Vol. 11, № 8. P. 1175–1181.
2. Chen C., Kong D., Tao Y. [et al.]. Half-wavelength-pitch silicon optical phased array with a 180° field of view, high sidelobe suppression ratio, and complex-pattern beamforming. *Optica*. 2024. Vol. 11, № 11. P. 1575–1582.
3. Souissi H., Gromovyi M., Septembre I. [et al.]. Mode-locked waveguide polariton laser. *Optica*. 2024. Vol. 11, № 7. P. 962–970.
4. Hatipoglu U., Sonar S., Lake D.P. [et al.]. In situ tuning of optomechanical crystals with nano-oxidation. *Optica*. 2024. Vol. 11, № 3. P. 371–375.
5. Memeo R., Crespi A., Osellame R. Micro-opto-mechanical glass interferometer for megahertz modulation of optical signals. *Optica*. 2024. Vol. 11, № 2. P. 178–183.