
ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

УДК 621.391.63:535.36

В.С. ЛУКАСЕВИЧ, О.С. КОМАРОВА, В.В. ХОЛІН, С.В. ПАВЛОВ,
В.І. ГОРДІЄНКО, К. М. ЧЕПУРНА

АНАЛІЗ ОДНОРІДНОСТІ РОЗПОДІЛУ ЩІЛЬНОСТІ ПОТУЖНОСТІ НА ВИХОДІ БАГАТОМОДОВОГО ОПТИЧНОГО ВОЛОКНА

ПП "Фотоніка Плюс", м. Черкаси, Україна, e-mail: 0987705250a@ukr.net, info@fotonikaplus.com.ua

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ, Україна, e-mail: komarova.ollha@gmail.com

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна

Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна

Анотація. Досліджено вплив радіуса вигину багатомодового волоконного світловода зі ступінчастим профілем показника заломлення на просторовий розподіл щільності потужності лазерного випромінювання на його виході. Для проведення експерименту розроблено термостабілізований лазерний модуль на основі трьох лазерних діодів з довжиною хвилі 1064 нм та систему введення випромінювання у багатомодове оптичне волокно типу 200/240/375 мкм. Дослідження проводилися для прямолінійного розташування волокна та при його вигині з діаметрами 30–70 мм. Встановлено, що вигин волоконного світловода спричиняє міжмодовий обмін енергією та зміну модового складу випромінювання, що проявляється у вирівнюванні просторового профілю інтенсивності. Показано, що оптимальний діаметр вигину для досліджуваного волокна становить 40–50 мм, за якого досягається компроміс між рівномірністю розподілу щільності потужності та збереженням вихідної потужності випромінювання. Виявлено, що кутові умови введення випромінювання та асиметрія торців волокна істотно впливають на форму вихідного профілю, однак вигин волокна знижує чутливість системи до цих факторів завдяки модовому перемішуванню.

Ключові слова: волоконний світловод; модовий склад; міжмодовий обмін; вигин волокна; розподіл щільності потужності; лазерне випромінювання; модове перемішування; спекл-структура; оптичне волокно

Abstract. The influence of the bending radius of a multimode optical fiber with a step-index refractive profile on the spatial distribution of laser radiation power density at the fiber output was investigated. For the experiment, a thermally stabilized laser module based on three laser diodes with a wavelength of 1064 nm and a radiation coupling system for a 200/240/375 μm multimode optical fiber were developed. The investigations were carried out for both straight fiber configuration and bent fiber configurations with diameters ranging from 30 to 70 mm. It was established that fiber bending causes intermodal energy exchange and modification of the modal composition of radiation, which manifests itself in the equalization of the spatial intensity profile. It was shown that the optimal bending diameter for the investigated fiber is 40–50 mm, at which a compromise between the uniformity of the power density distribution and the preservation of output radiation power is achieved. It was also found that the angular conditions of radiation coupling and the asymmetry of the fiber end faces significantly affect the shape of the output profile; however, fiber bending reduces the sensitivity of the system to these factors due to modal mixing.

Keywords: optical fiber; modal composition; intermodal coupling; fiber bending; power density distribution; laser radiation; modal mixing; speckle structure; multimode optical fiber.

DOI: 10.31649/1681-7893-2026-51-1-270-277

© В.С. ЛУКАСЕВИЧ, О.С. КОМАРОВА, В.В. ХОЛІН, С.В. ПАВЛОВ,
В.І. ГОРДІЄНКО, К. М. ЧЕПУРНА, 2026

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

1. ВСТУП

Основним фактором, що визначає модовий склад випромінювання у короткому відрізку волоконного світловоду (ВС), є умови введення світла у волокно. Вони включають геометричний розподіл джерела, кут падіння світлових променів, співвідношення апертур джерела та самого світловоду [1,2]. Кутовий переки між оптичною віссю вхідного пучка та віссю волокна призводить до переважного збудження мод вищих порядків, що суттєво змінює профіль інтенсивності на виході. За відсутності рівноважного модового розподілу, який у коротких волокнах практично не встановлюється [3], вихідне випромінювання зберігає виражену залежність від умов введення.

Багатомодовий ВС зі ступінчастим профілем показника заломлення підтримує поширення великої кількості мод, кожна з яких характеризується власною константою поширення, азимутальним та радіальним індексами. Результатом інтерференції цих мод на виході світловода є просторово-неоднорідна картина розподілу інтенсивності — спекл-структура, параметри якої визначаються набором збуджених мод. Умови збудження модових полів залежать від кута введення випромінювання відносно осі волокна: при осьовому введенні переважно збуджуються моди нижнього порядку з енергією, локалізованою поблизу осі, тоді як кутовий переки спричиняє збудження мод вищих порядків і суттєво змінює профіль інтенсивності на виході.

Ефективним засобом керування модовим складом є вигин ВС. Механічні деформації, зокрема вигини та скручування волокна, порушують симетрію хвилеводу та спричиняють міжмодовий обмін енергією [4]. Інтенсивність такого обміну зростає зі зменшенням радіуса вигину, що призводить до перерозподілу енергії між модами та зміни просторової структури спеклового поля на виході волокна. За певних умов це може супроводжуватися зменшенням спекл-контрасту та модового шуму, а також покращенням відношення сигнал/шум [5]. Водночас надмірно малий радіус вигину спричиняє радіаційні втрати, тому оптимальний радіус вигину є компромісом між рівномірністю розподілу інтенсивності та збереженням потужності випромінювання.

Попри значну кількість досліджень модового змішування у багатомодових волокнах, систематичні дослідження впливу конкретних значень радіуса вигину на просторовий розподіл інтенсивності випромінювання для волокон великого діаметра (200 мкм і більше) у літературі представлені обмежено.

Метою роботи є експериментальне дослідження впливу радіуса вигину багатомодового оптичного волокна на розподіл щільності потужності лазерного випромінювання на його виході, а також аналіз ролі кутових умов введення випромінювання як одного з основних чинників формування нерівномірного модового розподілу.

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Для дослідження впливу радіуса вигину на просторовий розподіл щільності потужності випромінювання на виході багатомодового волоконного світловоду було розроблено термостабілізований лазерний модуль (надалі лазерний модуль), який забезпечує контрольоване введення лазерного випромінювання у волокно та можливість варіювання кутових умов збудження мод.

Лазерний модуль складається з оптичної системи, що містить три ідентичні оптичні тракту, випромінювання яких паралельно сумується для введення в одне багатомодове волокно. На рисунку 1 наведено схему ходу променів термостабілізованого лазерного модулю.

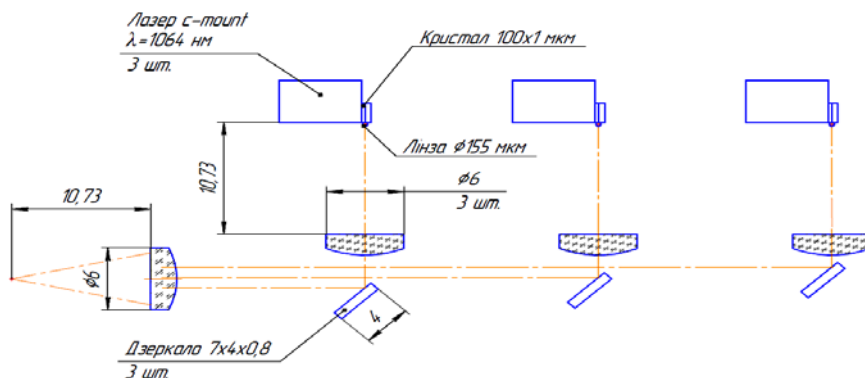


Рисунок 1 – Схема ходу променів термостабілізованого лазерного модулю для введення випромінювання у багатомодовий волоконний світловод

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ

Джерелом випромінювання є лазерний діод у корпусі c-mount (3 шт., довжина хвилі 1064 нм). Через значну дивергенцію вихідного променя за вертикальною «швидкою» віссю, першим оптичним елементом встановлено циліндричну лінзу FAC (Fast Axis Collimator). Вона забезпечує колімацію найбільш розбіжної компоненти випромінювання, формуючи анізотропний пучок з плоскопаралельним хвильовим фронтом за однією з координат (вузька смуга).

Для повної колімації променю використовується плоско-випукла лінза діаметром 8 мм, орієнтована плоскою стороною до випромінювача. Таке положення є оптимальним для перетворення розбіжного пучка у паралельний, оскільки забезпечує мінімальні аберації.

Кожен промінь спрямовується на власне поворотне дзеркало, встановлене під кутом 45°. Колімоване випромінювання відбивається від дзеркала, що змінює напрямок оптичної осі. Система дзеркал юстується таким чином, щоб три промені поширювалися паралельно один одному з мінімальною віссю між осями. Це дозволяє реалізувати компактну топологію пристрою, та забезпечує необхідні ступені свободи для точного просторового юстування променю відносно вхідної апертури ВС.

Кінцеве фокусування здійснюється другою плоско-випуклою лінзою діаметром 8 мм, встановленою випуклою поверхнею до ходу променів. Така орієнтація гарантує коректне заломлення трьох паралельних променів і формування мінімальної фокальної плями на вхідному торці оптичного волокна, закріпленого в оптичному роз'ємі стандарту SMA-905.

Для фізичного моделювання використовувався відрізок багатомодового волоконного світловода типу 200/240/375 мкм (діаметр серцевини — 200 мкм, діаметр оптичної оболонки — 240 мкм, діаметр захисного покриття — 375 мкм) зі ступінчастим профілем показника заломлення та кварцовою серцевиною завдовжки 1 м. Обидва торці волокна були зафіксовані у оптичних роз'ємах типу SMA-905 та відполіровані.

Експериментальні дослідження були спрямовані на визначення впливу радіуса вигину багатомодового волоконного світловода на просторовий розподіл щільності потужності лазерного випромінювання на його виході, а також на аналіз ролі умов введення випромінювання у формуванні модового складу.

Для проведення досліджень було створено експериментальну установку, схема якої наведена на рисунку 2, а загальний її вигляд — на рисунку 2.3. До складу установки входили: лазерний модуль (1), досліджуваний багатомодовий волоконний світловод типу 200/240/375 мкм (2), юстувальний столик для фіксації та позиціонування багатомодового ВС (3), колімуюча лінза (4), приймальний світловод із діаметром серцевини 400 мкм (5), прецизійний юстувальний столик для фіксування приймального світловода (6), фотоприймальна вимірювальна головка (7) до оптичного вимірювача потужності (8).

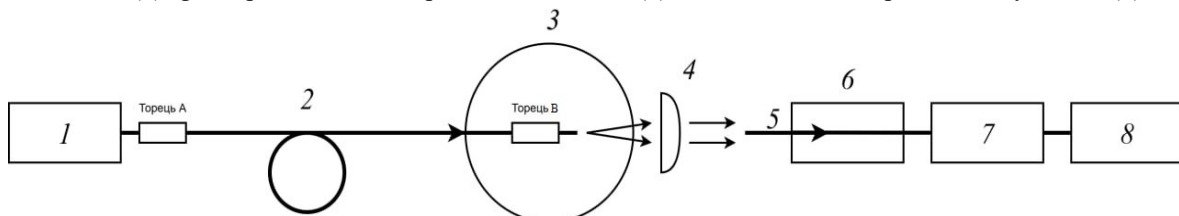


Рисунок 2 – Схема експериментальної установки для дослідження просторового розподілу щільності потужності випромінювання

Термостабілізований лазерний модуль (1) забезпечував формування стабільного лазерного випромінювання з незмінним рівнем вихідної потужності протягом експерименту. Випромінювання вводилося у досліджуваний багатомодовий світловод (2), закріплений на юстувальному столику (3), який забезпечував точне просторове позиціонування волокна та стабільність умов введення.

На виході досліджуваного волокна (2) встановлювалася колімуюча лінза (4), призначена для формування пучка випромінювання. Відстань між вихідним торцем ВС (2) та лінзою (4) становила 30 мм, а між лінзою (4) та приймальним світловодом (5) — 24 мм.

Реєстрація просторового розподілу щільності потужності випромінювання здійснювалася за допомогою приймального світловода (5) із діаметром серцевини 400 мкм, який виконував функцію просторового оптичного приймача. Приймальний світловод був закріплений на прецизійному юстувальному столику (6), що забезпечував його контрольоване переміщення у площині, перпендикулярній осі досліджуваного волокна. Сканування виконувалось поперек вихідного пучка з кроком 0,5 мм у діапазоні від -5 до +5 мм відносно оптичної осі світловоду.

У кожній точці сканування приймальний світловод (5) відбирав частину вихідного випромінювання, що відповідала локальному значенню щільності потужності у відповідній точці поперечного перерізу пучка. Зареєстроване випромінювання надходило до фотоприймальної головки (7),

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

підключеної до оптичного вимірювача потужності (8), за допомогою якого здійснювалася реєстрація значень оптичної потужності.

Дослідження проводилися у двох серіях вимірювань. У першій серії лазерне випромінювання вводилося через торець А волоконного світловода, а реєстрація здійснювалася на торці Б (надалі серія Торець А). У другій серії торці волокна змінювалися місцями: випромінювання вводилося через торець Б, а вимірювання проводилися на торці А (серія Торець Б). Такий підхід дозволив врахувати можливу асиметрію торців волокна та оцінити вплив умов введення випромінювання на формування модового розподілу.

Для кожної серії вимірювання виконувалися як для прямолінійного розташування волокна, так і за наявності вигину у центральній частині світловода. ВС викладався у вигляді кола (рис. 3) з діаметрами 30, 40, 50, 60 та 70 мм, що дало змогу дослідити вплив радіуса вигину на просторовий розподіл щільності потужності лазерного випромінювання на виході багатомодового волокна.

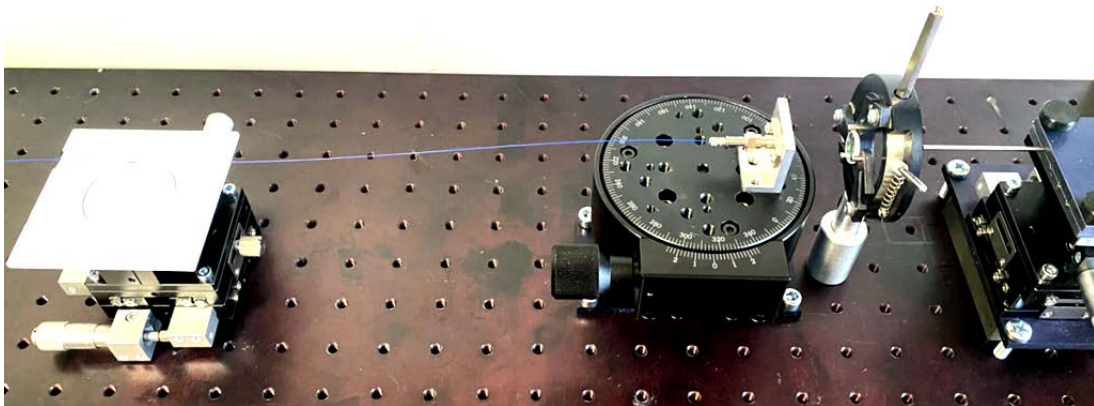


Рисунок 3 – Зовнішній вигляд експериментальної установки

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Результати вимірювань просторового розподілу щільності потужності лазерного випромінювання на виході досліджуваного світловода представлено графічно на рисунках 4÷7. Для кожної серії вимірювань побудовано два графіки: перший відображає поведінку профілю при прямому розташуванні волокна та вигинах з діаметрами 30 і 40 мм, другий — при вигинах з діаметрами 50, 60 та 70 мм.

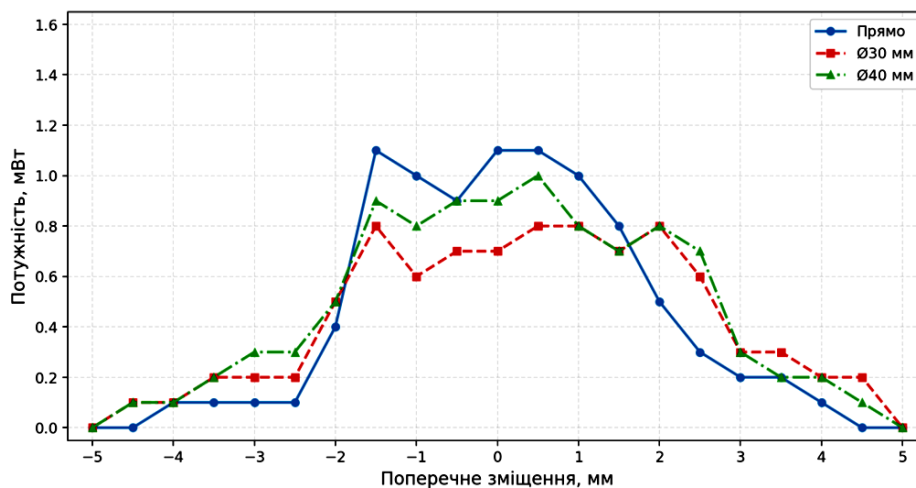


Рисунок 4 – Лазерне випромінювання вводилося через торець А волоконного світловода — пряме розташування (без вигинів), з вигином багатомодового ВС Ø30 та Ø40 мм (серія Торець А)

З рисунка 3.1 видно, що при прямому розташуванні волокна (серія – Торець А) профіль інтенсивності має чітко виражений максимум 1,1 мВт у центрі та порівняно круте спадання до нуля на відстані ± 4 мм від осі. Така картина є характерною ознакою переважного збудження мод нижнього порядку, енергія яких зосереджена поблизу осі волокна. Симетрія профілю відносно центральної осі є задовільною, що свідчить про коректне юстування оптичної системи введення.

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ

При формуванні вигину діаметром $\varnothing 40$ мм характер профілю суттєво змінюється: пікове значення залишається на рівні 0,9–1,0 мВт, однак бічні крила профілю помітно зростають — значення потужності у зоні $\pm(1,5–2,5)$ мм збільшуються порівняно з прямим розташуванням. Це є прямим свідченням активного перерозподілу енергії від мод нижнього порядку до мод вищого порядку внаслідок посилення міжмодового зв'язку при вигині. При діаметрі $\varnothing 30$ мм пікова потужність знижується до 0,7–0,8 мВт, а профіль набуває найбільш рівномірного вигляду у широкій зоні від -3 до $+3$ мм. Водночас загальне зниження зареєстрованої потужності свідчить про початок суттєвого впливу радіаційних втрат: при такому малому радіусі вигину частина мод вищого порядку переходить з серцевини в оболонку і більше не бере участі у формуванні вихідного поля.

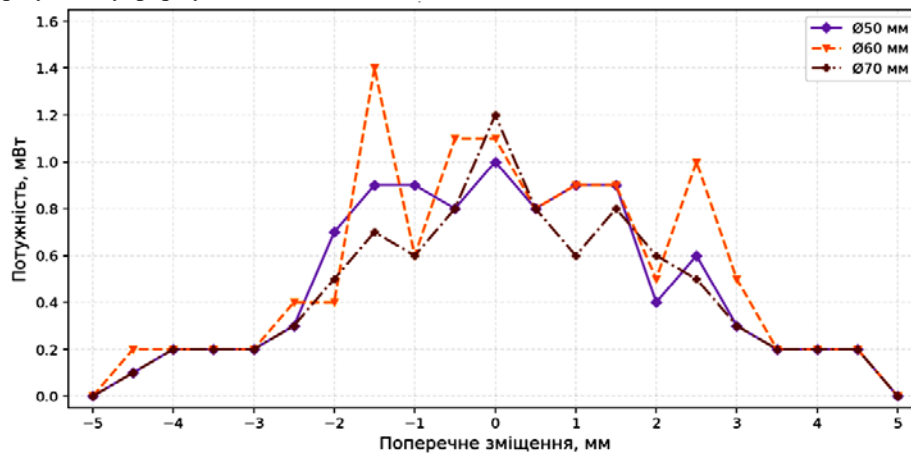


Рисунок 5 – Лазерне випромінювання вводилося через торець А багатомодового волоконного світловода — з вигином багатомодового ВС $\varnothing 50$, $\varnothing 60$ та $\varnothing 70$ мм (серія Торець А)

Аналіз рисунка 3.2 показує, що при діаметрі вигину $\varnothing 70$ мм пікове значення незначно зростає до 1,2 мВт, проте профіль зберігає виражену центральну симетрію з відносно крутими бічними схилами. Це підтверджує, що при великих радіусах вигину інтенсивність міжмодового зв'язку є недостатньою для помітного перерозподілу енергії — модовий склад залишається практично незмінним порівняно з прямим волокном. При діаметрі $\varnothing 60$ мм спостерігається характерна нерівномірність профілю з локальним максимумом на позиції $-1,5$ мм (1,4 мВт), що може свідчити про початок активного міжмодового обміну з нерівномірним збудженням окремих модових груп на перехідному режимі між слабким і помітним зв'язком мод. Профіль при $\varnothing 50$ мм є найбільш рівномірним і симетричним з-поміж усіх досліджених варіантів серії Торець А: потужність у центральній зоні від $-1,5$ до $+1,5$ мм коливається в межах 0,8–1,0 мВт, що відповідає нерівномірності менше 20%.

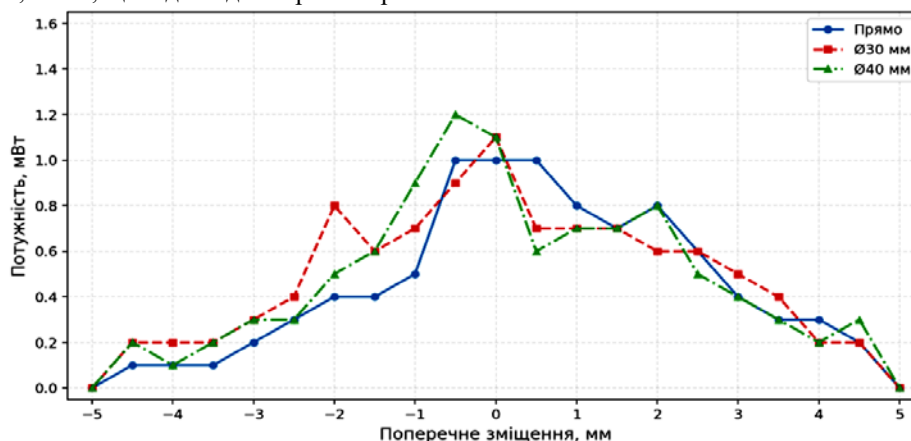


Рисунок 6 – Лазерне випромінювання вводилося через торець Б багатомодового волоконного світловода — пряме розташування (без вигинів), з вигином багатомодового ВС $\varnothing 30$ та $\varnothing 40$ мм (серія Торець Б)

Результати серії Торець Б, представлені на рисунку 3.3, виявляють важливу відмінність від серії Торець А. При прямому розташуванні волокна профіль є помітно несиметричним — максимум зміщений до від'ємних значень x , а спадання у від'ємному напрямку відбувається повільніше, ніж у додатному. Ця асиметрія є прямим експериментальним підтвердженням основної тези роботи: незначний кутівий

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

перекіс площини полірування торця відносно осі волокна, неминучий при механічному поліруванні у конекторі SMA-905, вносить систематичну асиметрію в умови введення і суттєво впливає на форму вихідного профілю. При вигині Ø40 мм симетрія профілю помітно покращується, а нерівномірність у центральній зоні зменшується, що свідчить про здатність вигину частково компенсувати вплив початкових умов збудження. При Ø30 мм, аналогічно серії Торець А, досягається максимальна рівномірність, але ціною зниження загальної потужності через радіаційні втрати.

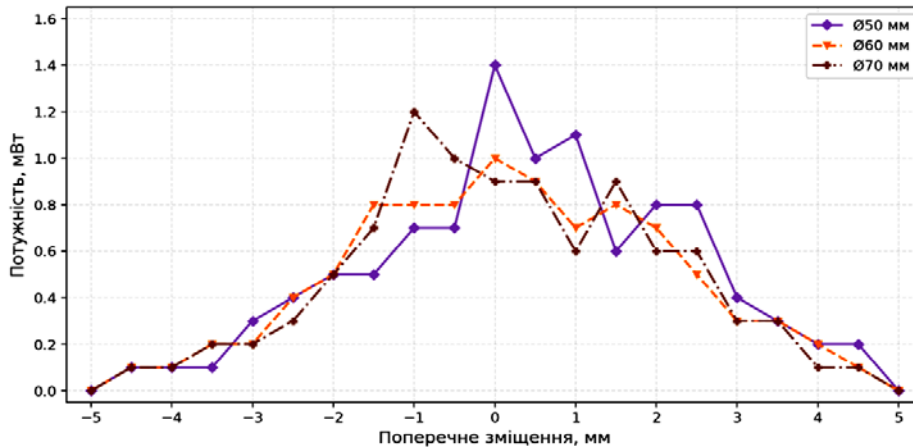


Рисунок 7 – Лазерне випромінювання вводилося через торець Б багатомодового волоконного світловода —з вигином багатомодового ВС Ø50, Ø60 та Ø70 мм (серія Торець Б)

На рисунку 3.4 видно, що при великих діаметрах вигину (Ø70 мм) асиметрія профілю серії Торець Б зберігається, хоча й дещо зменшується порівняно з прямим розташуванням. При Ø50 мм профіль стає практично симетричним, а рівномірність у центральній зоні є зрівняною з аналогічним результатом серії Торець А. Це підтверджує, що при оптимальних діаметрах вигину обидві серії збігаються за характером розподілу незалежно від початкових умов збудження на вхідному торці.

Порівняння двох серій дозволяє зробити важливий узагальнюючий висновок: вигин волокна є не лише інструментом перерозподілу енергії між модами, але й механізмом усереднення та нормалізації модового складу, що знижує чутливість вихідного розподілу до конкретних умов збудження на вхідному торці. Оптимальний діаметр вигину 40–50 мм забезпечує найкращий компроміс між рівномірністю профілю інтенсивності та збереженням потужності для досліджуваного волокна 200/240 мкм завдовжки 1 м.

Отримані результати дозволяють рекомендувати для багатомодових волоконних світловодів малих довжин використання контрольованого вигину з діаметром 40–50 мм з метою покращення однорідності просторового розподілу випромінювання. Застосування менших діаметрів вигину (близько 30 мм) забезпечує додаткове вирівнювання профілю інтенсивності, однак супроводжується помітним зростанням радіаційних втрат. Для світловодів малого діаметра та невеликої довжини такий підхід може бути ефективним способом часткової нормалізації модового складу та зниження впливу початкових умов збудження.

ВИСНОВКИ

У роботі експериментально досліджено вплив радіуса вигину багатомодового волоконного світловода типу 200/240/375 мкм на просторовий розподіл щільності потужності лазерного випромінювання на його виході.

1. Показано, що при прямолінійному розташуванні волокна профіль інтенсивності характеризується вираженим центральним максимумом та значною залежністю від умов введення випромінювання. Встановлено, що навіть незначна асиметрія торців волокна або кутовий перекіс при введенні випромінювання призводять до помітної асиметрії вихідного профілю та зміни модового складу.

2. Експериментально підтверджено, що вигин волоконного світловода спричиняє міжмодовий обмін енергією та модове перемішування, внаслідок чого відбувається вирівнювання просторового розподілу щільності потужності. Найбільш виражений ефект спостерігається для діаметрів вигину 40–50 мм, за яких забезпечується найбільш рівномірний і симетричний профіль інтенсивності при відносно незначних втратах потужності.

3. Встановлено, що надмірне зменшення діаметра вигину до 30 мм супроводжується зростанням радіаційних втрат та зниженням загальної потужності випромінювання, тоді як при великих

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ

діаметрах вигину (60–70 мм) інтенсивність міжмодового зв'язку є недостатньою для суттєвого перерозподілу енергії між модами.

4. Отримані результати свідчать, що вигин багатомодового волоконного світловода може бути ефективним інструментом керування модовим складом та просторовим профілем випромінювання у волоконно-оптичних системах. Визначений оптимальний діапазон діаметрів вигину може бути використаний при розробленні лазерних систем доставки випромінювання та волоконно-оптичних пристроїв, де важливо забезпечити рівномірний розподіл щільності потужності на виході волокна.

ПОДЯКА

Дослідження виконано за підтримки проєкту (№ держреєстрації 0126U002063) Міністерства освіти і науки України

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. S. Kobayashi and O. Sugihara, "Transformation of the intensity profile for a step-index multimode fiber core," *IEICE Electronics Express*, vol. 14, no. 11, Art. no. 20170375, 2017.
2. А. С. Андрущак, З. Ю. Готра, О. С. Кушнір, *Прикладна електродинаміка інформаційних систем: навч. посіб.* Львів, Україна: Видавництво Львівської політехніки, 2012, 304 с.
3. S. Savović, A. Simović, and A. Djordjević, "Influence of width of launch beam distribution on equilibrium mode distribution in W-type glass optical fibers," *Optics & Laser Technology*, vol. 48, pp. 565–569, 2013, doi: 10.1016/j.optlastec.2012.11.033.
4. D. Z. Anderson, M. A. Bolshtyansky, and B. Y. Zel'dovich, "Stabilization of the speckle pattern of a multimode fiber undergoing bending," *Optics Letters*, vol. 21, no. 11, pp. 785–787, Jun. 1996, doi: 10.1364/OL.21.000785.
5. M. D. Gijón et al., "Experimental characterization of the speckle pattern at the output of a multimode optical fiber," *Optics Express*, vol. 27, no. 20, p. 27737, 2019, doi: 10.1364/OE.27.027737.
6. Komarova Olga, Kholin Volodymyr, et al. "Physical modeling of output cascades and terminal devices of laser medical equipment with a rectangular cross-section of the output optical beam", *Proc. SPIE 13400, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2024*, 134000D (16 December 2024); <https://doi.org/10.1117/12.3054916>
7. Лазер і здоров'я : монографія / А. В. Кіпенський, Л. Я. Васильєва-Лінецька, Вуйцік Вальдемар [та ін.] ; заг. ред. А. В. Кіпенського ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Харків : Міська друкарня, 2024. – 387 с. : іл. - (Фізична та біомедична електроніка), <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/d6581393-a4e7-456c-af18-f15060c14c25> .
8. О. Комарова, «Теплові характеристики потужних лазерних діодів та ефективність пасивного тепловідведення для медичних лазерних систем», *Опт-ел. інф-енерг. техн.*, вип. 50, вип. 2, с. 300–310, Січ 2026.

REFERENCES

1. S. Kobayashi and O. Sugihara, "Transformation of the intensity profile for a step-index multimode fiber core," *IEICE Electronics Express*, vol. 14, no. 11, Art. no. 20170375, 2017.
2. A. S. Andrushchak, Z. Yu. Gotra, O. S. Kushnir, *Applied Electrodynamics of Information Systems: Textbook*. Lviv, Ukraine: Lviv Polytechnic Publishing House, 2012, 304 p.
3. S. Savović, A. Simović, and A. Djordjević, "Influence of width of launch beam distribution on equilibrium mode distribution in W-type glass optical fibers," *Optics & Laser Technology*, vol. 48, pp. 565–569, 2013, doi: 10.1016/j.optlastec.2012.11.033.
4. D. Z. Anderson, M. A. Bolshtyansky, and B. Y. Zel'dovich, "Stabilization of the speckle pattern of a multimode fiber undergoing bending," *Optics Letters*, vol. 21, no. 11, pp. 785–787, Jun. 1996, doi: 10.1364/OL.21.000785.
5. M. D. Gijón et al., "Experimental characterization of the speckle pattern at the output of a multimode optical fiber," *Optics Express*, vol. 27, no. 20, p. 27737, 2019, doi: 10.1364/OE.27.027737.
6. Komarova Olga, Kholin Volodymyr, et al. "Physical modeling of output cascades and terminal devices of laser medical equipment with a rectangular cross-section of the output optical beam", *Proc. SPIE 13400, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2024*, 134000D (16 December 2024); <https://doi.org/10.1117/12.3054916>

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

7. Laser and health: monograph / A. V. Kipensky, L. Ya. Vasilyeva-Linetska, Vuysik Valdemar [et al.]; general editor A. V. Kipensky; National Technical University "Kharkiv. Polytechnic Institute". – Kharkiv: City Printing House, 2024. – 387 p. : ill. - (Physical and Biomedical Electronics), <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/d6581393-a4e7-456c-af18-f15060c14c25> .
8. О. Комарова, "Thermal characteristics of powerful laser diodes and the efficiency of passive heat removal for medical laser systems", Opt-el. inf-energ. techn., vol. 50, vol. 2, p. 300–310, Jan 2026.

Дата надходження: 12.03.2026

Дата прийняття до друку після рецензування: 25.04.2026

Дата публікації: 18.06.2026

Ця робота ліцензується відповідно до
[Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

ЛУКАСЕВИЧ ВІТАЛІЙ СЕРГІЙОВИЧ – інженер-технолог ПП "Фотоніка Плюс", м. Черкаси, Україна, [e-mail: 0987705250a@ukr.net](mailto:0987705250a@ukr.net), <https://orcid.org/0009-0008-6156-3874>

КОМАРОВА ОЛЬГА СЕРГІЇВНА – інженер-технолог ПП "Фотоніка Плюс", аспірантка, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ, Україна, [e-mail: komarova.ollha@gmail.com](mailto:komarova.ollha@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-0060-5996>

ХОЛІН ВОЛОДИМИР ВІКТОРОВИЧ – к.т.н., директор ПП "Фотоніка Плюс",
[e-mail: info@fotonikaplus.com.ua](mailto:info@fotonikaplus.com.ua), <https://orcid.org/0000-0002-0232-0230>

ПАВЛОВ СЕРГІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ – Заслужений діяч науки і техніки України, д.т.н., професор кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем ВНТУ,
[e-mail: psv@vntu.edu.ua](mailto:psv@vntu.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0002-0051-5560>

ГОРДІЄНКО ВАЛЕНТИН ІВАНОВИЧ – Лауреат Державної Премії України в галузі науки і техніки, д.т.н., професор, Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна,
[e-mail: v.hordiienko@chdtu.edu.ua](mailto:v.hordiienko@chdtu.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0002-9223-9013>

ЧЕПУРНА КАТЕРИНА МИКОЛАЇВНА - інженер-електронік ПП "Фотоніка Плюс",
[e-mail: info@fotonikaplus.com.ua](mailto:info@fotonikaplus.com.ua), <https://orcid.org/0009-0004-5022-1108>

**Vitalii LUKASEVYCH, Olha KOMAROVA, Volodymyr KHOLIN, Sergii PAVLOV,
Valentin GORDIENKO, Kateryna CHERPURNA**

ANALYSIS OF THE UNIFORMITY OF THE POWER DENSITY DISTRIBUTION AT THE OUTPUT OF A MULTIMODE OPTICAL FIBER

Private Enterprise "Fotonika Plus", Cherkasy, Ukraine,
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine
Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine
Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine