

## **ПІДВИЩЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ОПТОВОЛОКОННИХ СТРУКТУР В УМОВАХ ВИСОКИХ РІВНІВ ПОТУЖНОСТІ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ**

***Б.О. Малик, О.В. Токарева, С.Б. Малик-Заморій**  
**Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна**  
**E-mail: olena.tokarieva@nure.ua***

Розглянута задача підвищення ефективності роботи оптичних волокон в умовах високих рівнів потужності іонізуючого випромінювання. Пропонується для збереження амплітудного і часового балансів у лініях передач і контрольно-вимірювальних приладах при високих рівнях затухання потужності електромагнітної хвилі під впливом радіоактивності компенсувати втрати потужності шляхом підвищення ефективності вводу випромінювання високопотужних джерел в оптичне волокно, особливо одномодове. Таку задачу можна вирішити використовуючи узгоджуючу секцію, що перетворює просторові і фазові параметри модового поля і значно підвищує ефективність вводу випромінювання в одномодове оптичне волокно. Для цього вибрано пристрій узгодження між джерелом і волокном, метод виготовлення пристрою узгодження, проведено математичне моделювання методу контролю параметрів пристрою узгодження, експериментальне дослідження методу з використанням установки для отримання інтерференційних картин одномодового волокна та розробленого програмного забезпечення.

### **ВСТУП**

В умовах широкого використання оптичних волокон як в якості середовища для передачі інформації, так і для реалізації давачів фізичних та хімічних параметрів навколишнього середовища виникає потреба вводу в них високих рівнів потужності електромагнітного випромінювання. Особливо це актуально при використанні оптичних волокон в умовах дії високих доз іонізуючого випромінювання, що може бути необхідним для систем збору та передачі інформації при управлінні технологічними процесами та наукових досліджень в ядерній галузі.

Вплив іонізуючого випромінювання на скло має багатофакторний характер. Під його впливом руйнуються хімічні зв'язки, що утворюють матрицю скла, в результаті чого створюються нові донорні або акцепторні рівні енергії електрона, між якими стають можливі електронні переходи. Багато з цих переходів створюють втрати в видимій і ближній інфрачервоній областях спектру.

При малих дозах опромінення наведені іонізуючим випромінюванням втрати прямо пропорційні дозі. Однак чутливість до радіації в різних волокон різна і коливається від 0,1 до 10 (дБ/км)/рад. У багатокомпонентних стеклах хімічні зв'язки особливо чутливі до радіації, і тому оптичні волокна, які мають серцевину з кварцу, легованого германієм або бором, більш чутливі до впливу радіації, ніж волокна з чистого штучного кварцу.

Для збереження амплітудного і часового балансів у лініях передач і контрольно-вимірювальних приладах при високих рівнях затухання потужності електромагнітної хвилі під впливом радіоактивності необхідно компенсувати втрати потужності шляхом підвищення ефективності вводу випромінювання високопотужних джерел в оптичне волокно, особливо одномодове.

### **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ**

Метою роботи є обґрунтування, використання та дослідження методу підвищення ефективності вводу випромінювання потужних джерел в одномодові оптичні волокна.

Для цього необхідно вирішити наступні задачі:

- вибрати пристрій узгодження між потужним джерелом і одномодовим оптичним волокном, який зможе забезпечити амплітудний баланс у волоконно-оптичній системі при високих рівнях іонізуючого випромінювання;
- вибрати метод виготовлення пристрою узгодження з параметрами, що забезпечать максимальний коефіцієнт передачі енергії із потужного джерела в волокно;
- провести математичне моделювання методу контролю параметрів пристрою узгодження;
- експериментально дослідити модель та елементи пристрою узгодження;
- провести аналіз результатів, отриманих під час експерименту.

### **ВИБІР ОПТИМАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ УЗГОДЖЕННЯ МІЖ ДЖЕРЕЛОМ І ВОЛОКНОМ**

При реалізації оптоволоконних ліній зв'язку часто виникає задача узгодження оптоелектронних компонентів і волокон з різними поперечними перетинами випромінюючої і приймаючої областей та різними числовими апертурами. Варіантом такого завдання може бути з'єднання одномодового (ОВ) і багатомодового волокон (БВ) або випромінювачів і фотоприймачів з волокнами різних типів [1].

Наприклад, при використанні лазерного діода для передачі великої потужності через ОВ необхідне узгодження полів, що генеруються діодом і виникають у пов'язаному з ним ОВ. Доводиться погоджувати параметри електромагнітних коливань і, отже, геометричних параметрів елементів. Тільки в такому випадку, навіть в умовах великих втрат

пропускної здатності при високих дозах опромінення, волоконно-оптична система збереже свою працездатність.

Одним з варіантів системи для узгодження полів можуть бути так звані каскадні волокна, в яких приймальне волокно спеціальної форми і ділянки градієнтних БВ інтегровані в ОВ (рис. 1).



Рис. 1. Каскадне волокно, що містить клиноподібний наконечник + БГС 1 + БГС 2 + ОВС

При виготовленні узгоджуючої секції у вигляді клиноподібного багатомодового оптичного волокна послідовно зрощують два відрізки багатомодових градієнтних оптичних світловідвідів (БГС 1 і БГС 2) і одномодового волоконного світловоду (ОВС).

Така узгоджуюча секція перетворює еліптичний профіль випромінювання в круговий, а розмір модового поля на виході другого багатомодового градієнтного оптичного волокна БГС 2 дорівнює розміру модового поля, необхідного для ефективного збудження ОВС.

Приведені в роботі [1] теоретичні викладки і експериментальні дані говорять про те, що можна спроектувати таку послідовну структуру з БГС 1, БГС 2 і ОВС, яка забезпечить ефективну передачу енергії від випромінювача в ОВ. Однак технічні помилки під час виготовлення таких секцій тягнуть за собою додаткові втрати і погіршення сполучних характеристик, так як кожна БГС-область має свої визначені функції, такі як фазове перетворення, перетворення розміру, перетворення профілю.

Тому геометричні розміри кожної ділянки пристрою узгодження потрібно контролювати з точністю до 1 мкм. Це дозволить зменшити додаткові втрати зв'язку різних компонентів до прийнятних величин.

Якщо каскадне волокно з двома або більше МВ секціями інтегровано в ОВ, то втрати зв'язку накопичуються через неточності довжини кожної секції МВ. Таким чином, точність розташування сполучної площини між секціями волокна дуже важлива.

На цей час втрати в з'єднанні можна знизити до 0,03 дБ. Для знаходження сполучної площини волокон при виготовленні пристрою узгодження звичайно необхідно використовувати мікроскопи з високою роздільною здатністю. У дослідженні Хайбара [2] для оцінки місця розташування сполучної площини спостереження проводяться під мікроскопом зі збільшенням 360X. Однак відстань між волокном і об'єктивом у мікроскопах з високою роздільною здатністю дуже мала.

У виробництві каскадного волокна процедура сколювання вимагає великого простору, в якому

відстань між волокном і лінзою пристрою контролю повинна бути більше ніж 4 см. Отже, метод визначення положення сполучної площини з великою робочою відстанню (> 40 мм) і з малим збільшенням (< 8X) контрольної системи є ключем до поліпшення процесу виготовлення каскадних волокон [3].

Для поліпшення сполучних характеристик і враховуючи технологічні особливості виготовлення компонентів необхідно розробити нові методи контролю геометричних параметрів різних ділянок волокон, що з'єднуються, які забезпечать можливість вільного доступу інструменту в робочу зону [4].

Поставлена задача виготовлення узгоджуючої секції оптичних волокон, в якій знімаються обмеження на робочу відстань між волокном і переднім фронтом оптичної системи і виконується вимога до необхідної точності виготовлення узгоджуючої секції, що запропонована в [5].

Поставлена задача вирішується тим, що при виготовленні узгоджуючої секції межу розділу між різними ділянками, з'єднаних оптичних волокон, визначають за допомогою проєкції на двокоординатний фотоелектричний прилад зображення картини, що являє собою суперпозицію електромагнітних хвиль оптичного діапазону. Вони утворюються при проходженні через оптичні волокна паралельних світлових променів, взаємодіючих між собою. В результаті створюється смугаста картина, яка однозначно відображає розподіл енергії по смугах відповідно до оптичних та геометричних параметрів волокон. Потім картина проєктується на матричний фотоелектричний прилад, сигнал з якого у вигляді матриці значень сигналу з кожного елемента цього приладу опрацьовується для визначення межі розділу між волокнами.

## ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ОПТИЧНИХ ВОЛОКОН

У процесі аналізу методів вимірювання геометричних параметрів ОВ, заснованих на використанні деяких фізичних ефектів, наприклад, дифракції при вимірах мікрооб'єктів, інтерференції, голографії, основним інформаційним параметром є просторово-часова структура картини, отриманої в результаті взаємодії випромінювання з об'єктами.

Для спостереження сполучної площини при виготовленні узгоджуючої секції використовується непрямий інтерферометричний метод, який на відміну від дифракційних та голографічних методів є найбільш точним, простим у реалізації, а його недоліки в порівнянні з іншими методами представляються несуттєвими.

Інтерференційна картина, що отримується при додаванні і квадратичному проєктуванні когерентних світлових хвиль, характеризується безперервною зміною інтенсивності світла в полі інтерференції. Перетворення отриманого зображення в інтерференційний сигнал з дискретними значеннями аргументу часто можна розглядати як результат лінійної операції згортки.

Перетворення по-фотонно безперервного інтерференційного сигналу в сигнал з кінцевою безліччю значень є квантуванням. Операція квантування пов'язана з округленням значень безперервного сигналу, тому ця операція є нелінійною.

Похибку дискретизації можна розділити на дві складові: похибка усереднення всередині світлочутливого елемента та похибка, що обумовлена геометричним розташуванням елементів дискретизації в площині (x, y). Ці складові похибки можна дослідити на основі математичного апарату інтегральних перетворень і конфліктного аналізу для детермінованих і випадкових відхилень параметрів дискретизації. Похибку квантування зазвичай розглядають як результат впливу детермінованої нелінійності і випадкового шуму квантування. При цьому використовують статистичні методи аналізу.

Нові можливості вирішення задачі комп'ютерної обробки інтерференційних картин з'явилися в зв'язку із створенням лінійних і двовимірних приладів з переносом заряду. Їх перевагами є висока стабільність параметрів і надійність у роботі, висока точність кроку дискретизації (геометрична похибка не більше 0,3 мкм), які забезпечуються мікроелектронною технологією виготовлення, великий динамічний діапазон (до 60 дБ і більше).

Можливість використання приймачів випромінювання ПЗЗ для аналізу інтерференційної картини визначається тим, наскільки повно вони відповідають необхідним вимогам за кроком дискретизації, чутливістю і динамічному діапазону.

Серійні зразки приладів з зарядовим зв'язком мають крок дискретизації 12 мкм і менше, тому вони, як правило, забезпечують необхідний крок дискретизації інтерференційної картини.

### ОДЕРЖАННЯ ІНФОРМАЦІЇ З ІНТЕРФЕРЕНЦІЙНОЇ КАРТИНИ ОВ

Грунтуючись на проведених дослідженнях інтерференційних методів, методів квантування та дискретизації інтерференційних картин, були змодельовані інтерференційні картини, зображені на рис. 2.

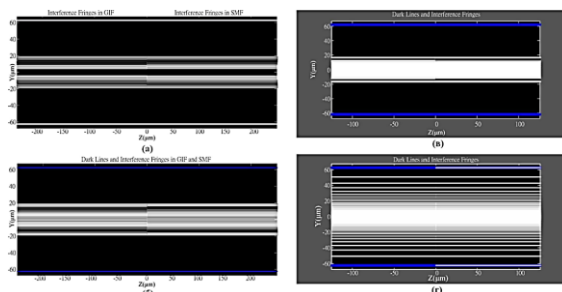


Рис. 2. Моделі оптичних волокон

Зображення характеризуються оригінальними темними лініями, що покриті інтерференційними смугами. Виходячи з цього, елемент з'єднання двох волокон може бути знайдений тільки за допомогою інтерференційних смуг. Так як на кількість інтерференційних смуг можуть впливати розміри волокна, інтенсивність світла та положення

фокальної площини, корекція цих трьох факторів необхідна для отримання задовільного зображення [6].

Використовуючи програмний комплекс MatLab, було обрано частину зображення оптичного волокна, яка характеризує каскадний перехід між двома волокнами. За допомогою вбудованих програмних засобів зображення було завантажено в програмний комплекс для подальшого аналізу і опрацьовано за алгоритмами, запропонованими в [6, 7].

Обране зображення було дискретизовано за просторовими координатами x та y і квантуванням значення ступені яскравості в кожній дискретній точці і отримано матрицю чисел, що відображають значення інтенсивності у відповідній точці зображення.

Використовуючи отриману матрицю, інтерференційна картина ОВ була досліджена на наявність зміни типу ОВ. Для цього була написана підпрограма, мета якої визначити на основі даних про яскравість тієї чи іншої частини картини межі типу ОВ [8]. В її основі лежить побудова графіків, які наглядно демонструють положення серцевини ОВ відносно оболонки. Графік залежності оптичної інтенсивності від поперечної координати інтерференційної картини ОВ першого типу зображено на рис. 3.

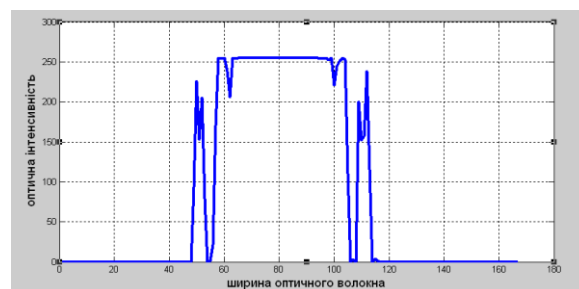


Рис. 3. Графік залежності оптичної інтенсивності від поперечної координати інтерференційної картини ОВ першого типу

Графік залежності оптичної інтенсивності від ширини ОВ другого типу показано на рис. 4.

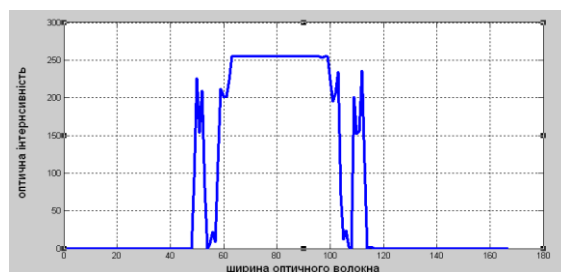


Рис. 4. Графік залежності оптичної інтенсивності від поперечної координати інтерференційної картини ОВ другого типу

За отриманими графіками визначаються межі стрибків оптичної інтенсивності, в яких знаходиться ОВ, за якими можна визначити координати початку і кінця інтерференційних смуг в ОВ. Це дає змогу, порівнявши результати, знайти перехід між різнотипними волокнами. Математично це

визначається стрибком яскравості, яка визначається за умовою:

$$K \geq |d_{i+5} - d_i|, \quad (1)$$

де  $K = 80$  – коефіцієнт градієнтного переходу;  $d$  – ступінь яскравості елемента інтерференційної картини.

За формулою (1) визначаються дві граничні точки, які фактично є максимальним стрибком інтенсивності інтерференційних смуг ОВ, які в подальшому використовуються для знаходження діаметру волокна та місця переходу між різномісними волокнами.

Для фільтрації даних від шуму було використано фільтр, який завдяки своєму алгоритму сканує дані, подані у вигляді графіку, і згладжує вірогідні похибки. Це дозволяє з більшою долею вірогідності, порівнюючи результати для двох типів волокон, знайти межі їх з'єднання. Результати роботи фільтра приведені на рис. 5, 6.

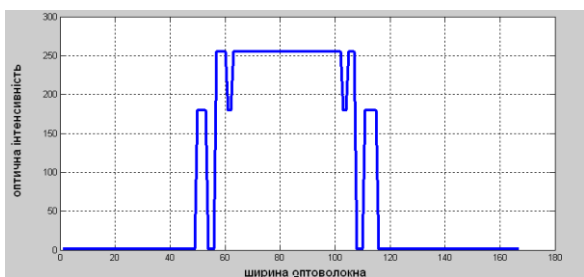


Рис. 5. Графік залежності оптичної інтенсивності від поперечної координати інтерференційної картини ОВ після фільтрації

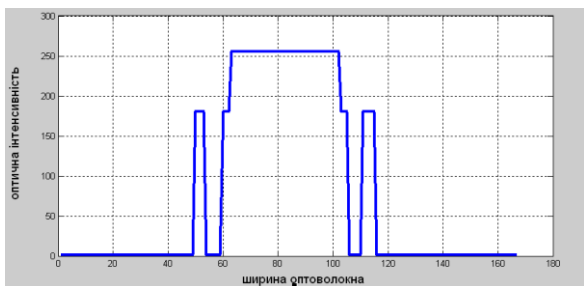


Рис. 6. Графік залежності оптичної інтенсивності від поперечної координати інтерференційної картини ОВ після фільтрації

Для подальшого вивчення зображення ОВ та визначення положення межі між типами з'єднаних оптичних волокон було написано підпрограму, яка визначала положення граничних стрибків оптичної інтенсивності відносно середньої лінії ОВ. Дані про зміну верхньої та нижньої границь діаметра серцевини ОВ зображені на рис. 7.

Грунтуючись на отриманих даних можна визначити стрибок оптичної інтенсивності за формулою (1), де  $K$  – коефіцієнт зміни діаметру ОВ не повинен бути менше 5.

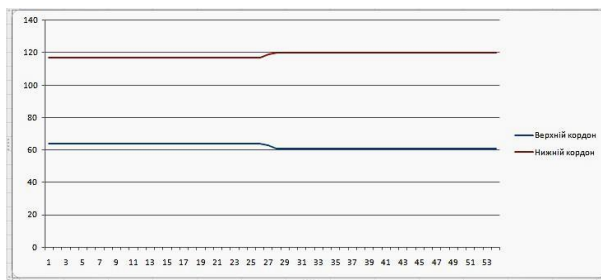


Рис. 7. Графіки зміни граничної оптичної інтенсивності ОВ відносно довжини ОВ

Було проведено моделювання методу, в якому розраховується відстань між крайніми границями оптичної інтенсивності. Для цього розроблено підпрограму, робота якої полягає у визначенні крайньої нижньої та верхньої границь стрибка оптичної інтенсивності та розрахунку відстані між ними. Результат роботи підпрограми показано на рис. 8.

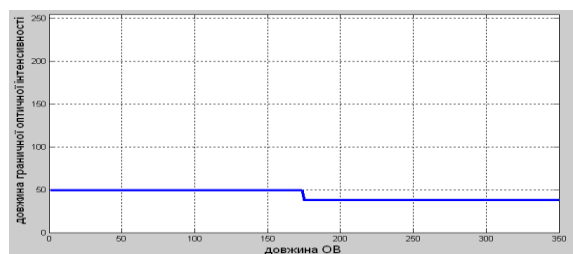


Рис. 8. Графік залежності відстані між крайніми границями оптичної інтенсивності від поперечної координати інтерференційної картини ОВ

Грунтуючись на отриманих результатах, можна дійти висновку, що метод пошуку межі між двома типами волокон, який ґрунтується на розрахунку відстані між крайніми границями оптичної інтенсивності, відповідає поставленій задачі та виконує вимоги в повному обсязі.

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Запропонований метод контролю для спостереження сполучної площини використовує явище інтерференції. Наступні моделювання і розрахунки дозволяють ідентифікувати місце стику. При 40-міліметровій робочій відстані, яка потрібна сучасним виробництвам, інтерференція світлових променів через волокно істотно збільшується. У таких зображеннях можна спостерігати відмінності між інтерференційними смугами в БВ і ОВ. Інтенсивності і кількість інтерференційних смуг в цих двох секціях волокна будуть різними, що дозволяє визначити місце розташування сполучної площини.

Оскільки зображення, зняте за допомогою контролюючої системи, включає вихідну інформацію про зображення і інтерференційну картину, то обидві моделі слід розглядати в один і той же час [9].

Щоб знайти оперативну інформацію про БВ- і ОВ-ділянках, застосовується програмна і апаратна обробка зображень. Для роботи реальної системи контролю різниця між зображеннями повинна бути досить великою. При довжині хвилі світлового пучка 650 нм і фокальній площині, яка змінюється від 0 до 150 мкм (крок – 1 мкм), програма визначає відмінності між ОВ- і БВ-ділянками в кожній фокальній площині. Гарний результат може бути отриманий, коли фокальна площина знаходиться на відстані  $X = 60$  мкм (рис. 9). Цієї інформації достатньо для програми контролю відмінностей на двох ділянках волокна.

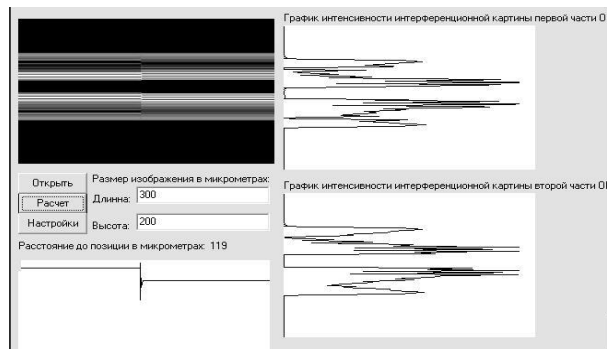


Рис. 9. Результат контролю на відстані фокальної площини  $X = 60$  мкм

Визначення точності розташування сполучної площини з похибкою близько 1 мкм дає можливість підвищити ефективність вводу випромінювання до 20 дБ. Це, в свою чергу, дасть змогу зберегти працездатність волоконно-оптичної системи з довжиною і рівнем іонізуючого опромінювання, прийнятними для військового, наукового та космічного призначення. Наприклад, якщо розглянути систему, в якій відношення потужності, що генерується передавачем, до мінімально допустимої потужності на вході приймача становить 50 дБ, то навіть при згасанні на 100 дБ/км, до якого приведе доза в 1000 рад, дозволить забезпечити роботу лінії з довжиною близько кілометра.

## ВИСНОВКИ

1. Обґрунтовано доцільність використання методу підвищення ефективності вводу випромінювання потужних джерел в одномодові оптичні волокна в умовах дії високих доз іонізуючого випромінювання. Це практично може збільшити сигнал на виході оптоволоконної системи на два порядки і підвищить надійність її роботи в умовах експерименту на реакторних установках чи при ядерному вибуху.

2. Запропоновано технологію виготовлення узгоджуючої секції, яка дає можливість підвищити ефективність вводу випромінювання потужних джерел в одномодове оптичне волокно і, таким чином, зберегти амплітудний баланс системи в екстремальних умовах високодозового опромінювання.

3. Були розглянуті методи контролю ОВ, засоби дискретизації та квантування інтерференційних зображень ОВ, основні принципи роботи яких стали основою розробленої програми для автоматичного пошуку місць з'єднань ОВ при виготовленні узгоджуючих секцій.

4. Проведено експериментальне дослідження методу з використанням установки для отримання інтерференційних картин ОВ та розробленого програмного забезпечення.

## БІБЛОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. H. Yoda, T. Endo, and K. Shiraishi. Cascaded GI-fiber chips with a wedge-shaped end for the coupling between an SMF and a high-power LD with large astigmatism // *J. Lightw. Technol.* 2002, v. 20, N 8, p. 1545-1548.

2. T. Haibara, M. Matsumoto, T. Tanifuji, and M. Tokuda. Monitoring method for axis alignment of single-mode optical fiber and splice-loss estimation // *Opt. Lett.* 1983, v. 8, N 4, p. 235-237.

3. А.И. Филипенко, Б.А. Малик, Н.П. Селенкова. Определение геометрических параметров каскадных волокон // *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. 2011, №58, с. 161-165.

4. А.И. Филипенко, Б.А. Малик, Е.В. Токарева, Н.П. Селенкова. Определение границ отсчета размеров секций в каскадных оптоволоконных структурах // *Технология приборостроения*. 2014, №3, с. 22-25.

5. B. Malyk, S. Malyk-Zamarii. Matching Elements Development Method Investigation for Electromagnetic Field Parameters Conversion under Emission Launching into Optical Fibers of Different Types // *Third International "Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology"*, october 4–6, 2016, Kharkiv, Ukraine.

6. Б.А. Малик, Н.П. Селенкова. Дослідження методу автоматизованого контролю геометричних параметрів з'єднань оптичних волокон // *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. 2015, №36(1145), с. 52-57.

7. Патент України №115811. Спосіб виготовлення узгоджуючої секції оптичних волокон. Публікація відомостей про видачу патенту: 25.04.2017, Бюл. №8.

8. А.И. Филипенко, Б.А. Малик, Н.П. Селенкова, В.В. Гончар. Контроль геометрических параметров каскадных оптоволоконных структур // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2012, №3/5(57), с. 28-31.

9. А.И. Филипенко, Б.А. Малик, Н.П. Селенкова. Распределение оптического поля волокон с различным профилем показателя преломления при поперечном освещении // *Сборник научных трудов V Международной научной конференции «Функциональная база нанoeлектроники»*. Харьков–Кацивели, 2012, с. 243-246.

Статья поступила в редакцию 02.03.2018 г.

## **ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ОПТОВОЛОКОННЫХ СТРУКТУР В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ УРОВНЕЙ МОЩНОСТИ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

*Б.А. Малик, Е.В. Токарева, С.Б. Малик-Заморий*

Рассмотрена задача повышения эффективности работы оптических волокон в условиях высоких уровней мощности ионизирующего излучения. Предлагается для сохранения амплитудного и временного балансов в линиях передач и контрольно-измерительных устройствах при высоких уровнях затухания мощности электромагнитной волны под влиянием радиоактивности компенсировать затраты мощности путем повышения эффективности ввода излучения высокоэнергетических источников в оптическое волокно, особенно одномодовое. Такую задачу можно решить, используя согласующую секцию, которая преобразует пространственные и фазовые параметры модового поля и значительно повышает эффективность ввода излучения в одномодовое оптическое волокно. Для этого выбраны устройство согласования между источником и волокном и метод изготовления устройства согласования; проведены математическое моделирование метода контроля параметров устройства согласования, экспериментальные исследования метода с использованием установки для получения интерференционных картин ОВ и разработанного программного обеспечения.

## **OPTICAL FIBER STRUCTURES PERFORMANCE ENHANCEMENT UNDER THE CONDITIONS OF IONIZING RADIATION HIGH POWER LEVELS**

*B.A. Malyk, O.V. Tokarieva, S.B. Malyk-Zamorii*

The problem of optical fibers performance improvement under the high levels of ionizing radiation power is considered. It is proposed to compensate the amplitude and temporal balance preservation in communication lines and servicing instrument under the high levels of electromagnetic wave power attenuation affected by radioactivity by the means of high-energy rays coupling efficiency increase for optical fiber, most notably single mode one. That kind of problem can be worked out with application of matching section that transforms mode field spatial and phase parameters and sufficiently increases the single mode optical fiber coupling efficiency. The matching device for source and fiber and the matching device manufacturing method are selected. The matching device parameters testing method mathematical simulation with its experimental research by the use of optical fiber interference fringe pattern projector and developed software are performed.