

Ю.А. Слінченко

## Сучасні волоконно-оптичні відгалужувачі X-типу з багатомодових кварц-кварцових волоконних світловодів

*Київський національний університет імені Тараса Шевченка,  
факультет радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем,  
пр. Ак. Глушкова, 4г, м. Київ, Україна, 03022  
[yas@univ.kiev.ua](mailto:yas@univ.kiev.ua)*

Удосконалено методику створення пасивних волоконних відгалужувачів X-типу. Як результат її апробації експериментально реалізовано ряд пасивних відгалужувачів X-типу з сучасних кварц-кварцових багатомодових світловодів. Використовуючи розвинену методику виготовлення пасивних відгалужувачів експериментально реалізовано керований волоконний відгалужувач X-типу на основі волоконного інтерферометра Маха-Цендера. Максимальне значення перерозподілу енергії по його вихідних каналах спостерігалось у випадку ефективного збудження мод найвищих порядків.

Ключові слова: багатомодові волоконні світловоди, пасивні волоконні відгалужувачі, керовані волоконні відгалужувачі, волоконний відгалужувач X-типу.

*Стаття поступила до редакції 09.04.2014; прийнята до друку 15.06.2014.*

### Вступ

Пасивні волоконні відгалужувачі X-типу (рис. 1) є неодмінними функціональними елементами волоконно-оптичних ліній зв'язку, волоконних датчиків [1] тощо. Тому розробка простої методики їх виготовлення [2] є важливою.



**Рис. 1.** Загальний вигляд пасивного волоконного відгалужувача X-типу.

Сучасні пасивні волоконно-оптичні відгалужувачі повинні задовольняти наступним вимогам: вносити низькі додаткові втрати (менше одиниць дБ), мати високий коефіцієнт направленості каналів (десятки дБ), суттєво не спотворювати модовий склад випромінювання [3]. Робота таких відгалужувачів на основі багатомодових волоконних світловодів ґрунтується на послідовному виходу напрямних мод з серцевини в оболонку в зоні вхідного конусу з подальшим направленням оболонкових мод, що сформувалися по загальній для обох каналів сплавленій оболонці. Розподіл цієї

енергії по каналам відбувається в зоні вхідного конусу, де випромінювання захвачується серцевинами і направляється далі. Змінюючи довжину сплавленої біконічної перетяжки у процесі виготовлення відгалужувача, можна змінювати коефіцієнт поділу потужності по його каналам [4].

Сьогодні досить поширеною є методика виготовлення волоконних відгалужувачів методом сплавлення. Однак використання при цьому саме звитих волокон призводить до погіршення фізичних параметрів відгалужувачів, ускладнює їх виготовлення і є особливо критичним у випадку виготовлення відгалужувачів типу  $N \times N$  ( $N > 2$ ). Також, для поліпшення характеристик та спрощення виготовлення, необхідно визначити параметри відгалужувачів у реальному часі, що можливо при автоматизації процесу їх створення.

Точність і стабільність роботи волоконних датчиків визначається, зокрема, відповідними характеристиками пасивних волоконних відгалужувачів, які входять до їх складу. Зміна коефіцієнта розподілу енергії по вихідним каналам таких відгалужувачів призводить до значного дрейфу нуля в датчиках на основі кільцевих інтерферометрів і зменшення на порядки чутливості відповідного приладу. Для компенсації подібних явищ використовують керовані волоконні відгалужувачі. Тому створення нових керованих волоконних відгалужувачів є актуальним завданням.

## I. Експериментальні результати та їх аналіз

У роботі пасивні волоконні відгалужувачі виготовлялись за удосконаленою методикою [2] на основі багатомодових кварц-кварцових світловодів з параметрами: діаметр серцевини – 50 мкм, оптичної оболонки – 125 мкм, затухання 3,2 дБ/км. Вимірювання втрат в коротких відрізках (до 1 м) волокон, відібраних для виготовлення відгалужувачів, виконано за методикою, описаною в [5].

Для виготовлення відгалужувача два волокна (з попередньо видаленими на місцях майбутнього сплавлення захисними оболонками) закріплювались паралельно один одному і сплавлялись між собою до утворення спільного моноволоконного відрізка. Потім виконувалось нагрівання цієї області електричною дугою та механічне розтягування з одночасним візуальним контролем (за допомогою мікроскопа, зображення з якого потрапляло на відеокамеру) форми та розмірів біконічного переходу. В процесі формування адиабатичного біконічного переходу виконувався оперативний контроль якості та коефіцієнту поділу потужностей оптичного випромінювання по каналах майбутнього волоконного відгалужувача. По закінченні формування біконічний перехід розташовувався всередині захисного чохла, що слугував в подальшому корпусом пристрою, який захищає біконічний перехід від деформацій та контакту з зовнішнім середовищем.

Запропонована технологія виготовлення відгалужувачів є не критичною до числа світловодів і дозволяє виготовляти відгалужувачі практично з будь-яким числом портів.

Параметри виготовлених пасивних відгалужувачів Х-типу (рис. 2) мали значення: коефіцієнт поділу потужності світла  $\eta = (P_2/(P_1+P_2))100\%$  – 42÷58%; додаткові втрати які вносяться відгалужувачем  $\kappa = 10\lg((P_1+P_2)/P_0) - \kappa < 1,3$  дБ; коефіцієнт направленості  $\mu = 10\lg(P_3/P_0) - \mu > 48$  дБ; коефіцієнт звуження (відношення початкового та кінцевого діаметрів волокна, що виміряний в області перетяжки звуження) – 1,5÷7; довжина робочої ділянки відгалужувача – 1 ÷ 15 мм.

Перевага запропонованої методики при виготовленні відгалужувача 2x2 полягає у тому, що замість традиційного звивання двох (чи більше) світловодів з наступним сплавленням та розтягом, відбувається сплавлення паралельних світловодів з тим самим наступним розтягом для формування біконічного переходу. Це призводить до більш рівномірного і симетричного розташування серцевин у біконічному переході (рис. 2 а) і, як наслідок цього – більш рівномірного перерозподілу (перекачки) енергії випромінювання між каналами. Також при цьому підвищується механічна міцність звареної ділянки відгалужувача, оскільки при такій методиці виготовлення практично відсутні напруження та деформації у волокні, що з'являються при звиванні та

подальшому сплавленні. Характерний зовнішній вигляд створених пасивних волоконних відгалужувачів Х-типу наведено на рис. 2 б, в.

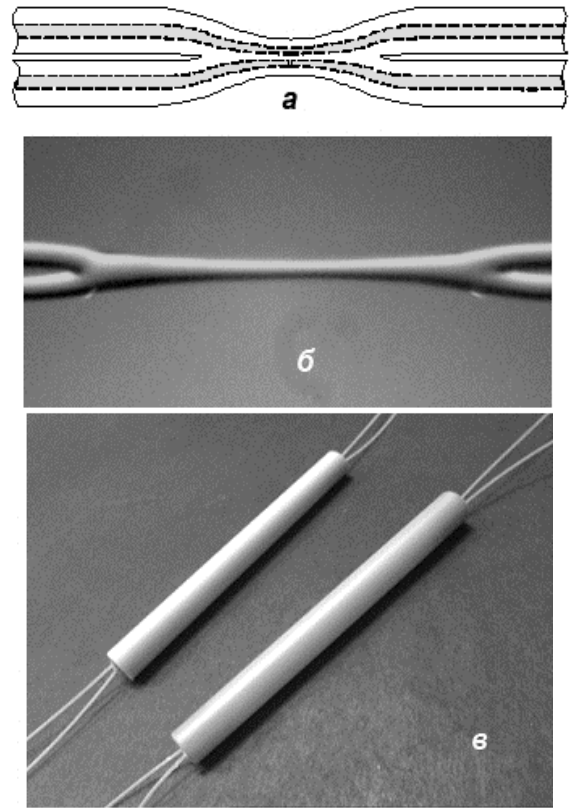


Рис. 2. Створені пасивні відгалужувачі Х-типу: а – функціональна схема; б – виготовлений відгалужувач; в – кінцевий вигляд відгалужувача.

Виготовлені відгалужувачі практично не впливали на модовий розподіл випромінювання на виході [2]. Для перевірки цього було використано автоматизовану систему визначення характеристик волоконно-оптичних елементів у реальному часі [6].

На основі реалізованих пасивних відгалужувачів Х-типу було створено керований волоконний відгалужувач Х-типу. Він структурно складається (рис. 3): з двох направлених пасивних відгалужувачів ПВВ<sub>1</sub> і ПВВ<sub>2</sub> Х-типу, з'єднані кінці яких утворюють інтерферометр Маха-Цендера з п'єзоелементом в кожному плечі (відповідно п'єзокерамічні циліндри ПКЦ<sub>1</sub> і ПКЦ<sub>2</sub>).

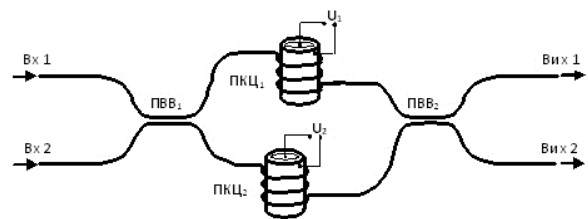


Рис. 3. Принципова схема керованого волоконного відгалужувача Х-типу.

Оптичне випромінювання, яке поступає на вхід Вх1 чи Вх2, через ПВВ<sub>1</sub> потрапляє в плечі

інтерферометра. Довжина останніх змінюється в залежності від величини і знаку напруг  $U_1$  і  $U_2$ , що подаються на ПКЦ<sub>1</sub> і ПКЦ<sub>2</sub> відповідно. Оптичні хвилі з двох плечей попадають на вхід тунельно-зв'язаних

хвилеводів, які утворює ПБВ<sub>2</sub>. Для них, у випадку ОВС, на Вих1 і Вих2 згідно з теорією зв'язаних хвиль [7], для розподілу поздовжніх компонент електричних полів моди  $A_1(z)$  і  $A_2(z)$  маємо

$$A_1(z) = (A_1^0 \cos kz - iA_2^0 \sin kz)e^{-ibz}, \quad A_2(z) = (-A_1^0 \sin kz + iA_2^0 \cos kz)e^{-ibz}, \quad (1)$$

де  $b$  – поздовжня постійна поширення моди;  $k$  – коефіцієнт тунельного зв'язку;  $A_1^0 \equiv A_1(z=0)$ ;  $A_2^0 \equiv A_2(z=0)$ . Без зменшення загальності тут хвилеводи вважаються ідентичними,

а поперечні компоненти поля  $E(x,y)$  нормовані  $E(x,y)E^*(x,y)=1$ , втратами нехтуємо.

Інтенсивності хвиль при умові 50% відгалуження ПБВ<sub>1</sub> на вихідних кінцях ПБВ<sub>2</sub> будуть мати вигляд

$$|A_1|^2 = \frac{1}{2}|A_{ex}|^2(1 - \sin(j_1 - j_2)), \quad |A_2|^2 = \frac{1}{2}|A_{ex}|^2(1 + \sin(j_1 - j_2)), \quad (2)$$

де враховано, що  $|A_1^0|^2 = |A_2^0|^2 = \frac{1}{2}|A_{ex}|^2$ ,  $A_{ex}$  – амплітуда поля на вході в ПБВ<sub>2</sub>, а  $j_1$  і  $j_2$  – фази відповідних хвиль.

З системи рівнянь (2) очевидно випливає, що зміна фаз випромінювання  $j_1$ ,  $j_2$  приведе до перерозподілу інтенсивності хвиль на виході кожного з каналів, виконуючи таким чином кероване відгалуження чи перемикання.

Габарити керованого волоконного відгалужувача визначались розмірами ПКЦ<sub>1</sub> і ПКЦ<sub>2</sub>, діаметр яких складав 3,5 см, а висота – 1,3 см, і двома пасивними відгалужувачами Х-типу з робочою довжиною  $z_0 = 1,1$  см. На п'єзокерамічні циліндри приклеювалось кілька витків волоконного світловода (загальною довжиною 0,4 м). Діаметр серцевини кварцового волокна становив 30 мкм.

Досліджений керований відгалужувач на основі багатомодових світловодів не дозволяє досягнути 100% перерозподілу енергії по вихідним каналам. Причина цього полягає в тому, що кожна  $j$  мода характеризується своєю постійною поширення моди і коефіцієнтом зв'язку  $k_j$ . Тому одночасно виконати умову  $j_{1j} - j_{2j} = \text{const}$  для всіх мод неможливо. Набір фаз для різних мод при подачі керуючого сигналу на п'єзокерамічний циліндр буде неоднаковим.

При побудові керованого відгалужувача враховано ту обставину, що довжина плечей інтерферометра повинна співпадати з максимально можливою точністю, щоб зменшити вплив теплового розширення при зміні температури. Подібне піднастроювання довжини волокна виконується за допомогою ПКЦ<sub>1</sub>.

Як джерело використовувався He-Ne лазер з

максимальною потужністю 10 мВт. При значенні постійної керуючої напруги на ПКЦ<sub>2</sub> 12,3 В. сигнал на Вих1 змінювався на 10%. Отже на багатомодовому волокні отримано коефіцієнт перерозподілення близько  $0,008\text{В}^{-1}$  (0,8%/В).

У випадку змінної керуючої напруги з частотою 40 кГц вимірний коефіцієнт глибини модуляції знаходився в межах від 2 до 18%. Максимальне значення перерозподілу енергії по вихідних каналах спостерігалось у випадку ефективного збудження мод найвищих порядків, що найменше просторово локалізовані у волоконному світловоді.

## Висновки

Таким чином, було удосконалено методику створення пасивних волоконних відгалужувачів Х-типу. Як результат її апробації експериментально реалізовано ряд пасивних відгалужувачів Х-типу з сучасних кварц-кварцових багатомодових світловодів.

На основі виготовлених пасивних волоконних відгалужувачів створено керований волоконний відгалужувач Х-типу на основі волоконного інтерферометра Маха-Цендера. Встановлено, що максимальне значення перерозподілу енергії по вихідних каналах такого відгалужувача спостерігалось у випадку ефективного збудження мод найвищих порядків.

**Сліщенко Ю.А.** – кандидат фізико-математичних наук, асистент кафедри.

- [1] T. Hwang, W. Cheng, Y. Su Jpn. J. Appl. Phys. 52, 062503 (2013).
- [2] В.І. Григоруку, Ю.Т. Онисько, Ю.А.Сліщенко, Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Серія фіз.-мат. науки 3, 300 (2012).
- [3] G. Z. Wang, K. A. Murphy, R. O. Claus, Effect of external index of refraction on multimode fiber couplers, Appl. Opt. 34 (36), 8289 (1995).

- [4] А. Снайдер, Дж. Лав, Теория оптических волноводов (Радио и связь, Москва, 1987).
- [5] В. І. Григорук, С. О. Масловський, Ю. Т. Онисько, Дослідження затухання світла в коротких волоконних світловодах і біконічних переходах, Вісник Київського університету. Серія фіз.-мат. науки 3, 213 (1993).
- [6] А. М. Василенко, В. І. Григорук, Ю. Т. Онисько, Ю. А. Слінченко, Відеодіагностика волоконно-оптичних елементів, Вісник Київського університету. Серія: фіз.-мат. науки 1, 273 (1999).
- [7] Х.-Г. Унгер Теория планарных и волоконных оптических волноводов (Мир, Москва, 1980).

Y.A. Slinchenko

## **Modern Fiber-Optic Couplers of X-type Based on Multimode Quartz-Quartz Optical Fibers**

*Taras Shevchenko national university of Kyiv, faculty of radio physics, electronics and computer systems, 4G, Prospekt Hlushkov, Kyiv, Ukraine, 03022*  
[yas@univ.kiev.ua](mailto:yas@univ.kiev.ua)

A technique of creation of X-types passive fiber couplers has been improved. By the technique, a number of passive fiber couplers of X-types as well as an active fiber coupler of X-type based on the Mach-Zehnder interferometer using modern quartz-quartz multimode fibers has been produced. Maximum energy redistribution in the active fiber coupler of X-type output channels was observed at the effective excitation of higher order modes.

**Keywords:** multimode optical fiber, passive fiber couplers, active fiber coupler, fiber couplers of X-types.