

## Estudio experimental de acopladores bicónicos de fibra óptica aplicados al desarrollo de multiplexores por división de longitud de onda

M.V. Hernández-Arriaga<sup>a,b</sup>, M. Bello-Jiménez<sup>a,\*</sup>, B. Ibarra-Escamilla<sup>b</sup>, A. Loredó-Trejo<sup>a</sup>,  
M. Durán-Sánchez<sup>c</sup>, H. Santiago-Hernández<sup>b</sup>, and E.A. Kuzin<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Instituto de Investigación en Comunicación Óptica, Universidad Autónoma de San Luis Potosí,  
Av. Karakorum 1470 Lomas 4a Secc., 78210 San Luis Potosí, S.L.P, México.*

<sup>b</sup>*Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica,  
L.E. Erro 1, Sta. Ma. Tonantzintla, Pue. 72824, México,*

<sup>c</sup>*CONACyT- Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica,  
L.E. Erro 1, Sta. Ma. Tonantzintla, Pue. 72824, México,*

*\*e-mail: m.bello@cactus.iico.uaslp.mx*

Received 10 August 2017; accepted 19 September 2017

Se reporta un estudio experimental de la técnica de fabricación de acopladores bicónicos de fibra óptica y su aplicación al desarrollo de multiplexores por división de longitud de onda (WDM, wavelength division multiplexer). Los parámetros de fabricación requeridos para el WDM son obtenidos del análisis teórico de la respuesta espectral de un acoplador débilmente fusionado. Como caso particular, se reporta el desarrollo de un WDM 1550/1850 nm, el cual es un dispositivo fundamental en el desarrollo de láseres de fibra óptica dopada con Tulio. Las dimensiones finales del dispositivo son una longitud total de 36.3 mm, una cintura uniforme de 6.5 mm de largo con una sección transversal de 23  $\mu\text{m}$ . El dispositivo exhibe bajas pérdidas por inserción de 0.17 dB, un espaciamiento entre canales de 303.52 nm y ancho de banda de  $\pm 50$  nm. Este trabajo establece una guía de fabricación para el desarrollo de acopladores y dispositivos WDM de fibra óptica.

*Descriptores:* Acopladores bicónicos de fibra; multiplexación por división de longitud de onda; laser de fibra dopada de Tulio.

An experimental study of the technique of fused biconical fiber couplers for the development of wavelength division multiplexers (WDM) is presented. The fabrication parameters required for the WDM are obtained from the theoretical analysis of the spectral response of a weakly fused coupler. As a particular case, the development of a 1550/1850 nm WDM is reported, which is a fundamental device in the implementation of Thulium-doped fiber lasers. The WDM has the total length of 36.3 mm, and a uniform tapered waist length of 6.5 mm with 23  $\mu\text{m}$  of cross section. The device exhibits insertion losses of 0.17 dB, a channel spacing of 303.52 nm and a  $\pm 50$  nm bandwidth. This publication could be considered a guide for the development of fiber optic couplers and WDM devices.

*Keywords:* Fused fiber couplers; wavelength division multiplexing; Thulium doped fiber laser.

PACS: 07.60.Vg; 42.55.Wd; 42.81.Qb

### 1. Introducción

Durante las últimas décadas los dispositivos ópticos fabricados bajo la técnica de fusión y estiramiento [1] se han convertido en componentes cruciales para la implementación de sistemas ópticos. Uno de los componentes más exitosos fabricado bajo esta técnica y que se ha mantenido con un significativo interés es el acoplador bicónico, el cual ha sido extensamente analizado bajo diferentes aproximaciones [2-6]. En los últimos años, con el desarrollo de los láseres todo-fibra el acoplador se ha convertido en un dispositivo de gran demanda debido a sus aplicaciones prácticas, principalmente en la división de haces mediante canales ópticos; sin embargo, al mismo tiempo se ha optimizado su desempeño mediante procesos de fabricación de alta precisión consiguiendo reducir su tamaño y sus pérdidas de inserción. Con la introducción de nuevos medios de ganancia en las cavidades láser de fibra óptica, el acoplador debe ser objeto de constante desarrollo en su diseño con la finalidad de operar en diferentes longitudes de onda. No obstante, el alcance experimental del dispositivo contempla aplicaciones más complejas que la simple división de haces; un acoplador bicónico  $2 \times 2$  (constituido

por dos puertos de entrada y dos puertos de salida) fabricado mediante un proceso debidamente controlado, produce un espectro sinusoidal de transmisión dependiente de la longitud de onda de fabricación, de tal manera que una manipulación adecuada del proceso de fabricación puede permitir que los acopladores operen en una extensa gama de aplicaciones como divisores de polarización [7,8], filtros [9,10], sensores de fibra óptica [11-13] y componentes para el multiplexado de longitudes de onda (WDM, wavelength division multiplexer) [14,15], entre otros. En el caso específico de un WDM, estos dispositivos típicamente están constituidos por un puerto de entrada y dos puertos de salida, y una de sus aplicaciones más esenciales es en cavidades láser de fibra óptica, donde los haces de bombeo y señal se multiplexan para formar una cavidad todo-fibra. Entre las características deseables para un WDM podemos mencionar un bajo costo de fabricación, bajas pérdidas de inserción y una fácil integración con componentes de fibra óptica.

En este artículo nuestro objetivo es reportar las condiciones para la fabricación de acopladores bicónicos de fibra óptica y su implementación como dispositivos WDM. El proceso de fabricación se fundamenta en un análisis de la respuesta

espectral para un acoplador de fibra óptica por fusión débil, de donde se obtienen los parámetros para la fabricación de un WDM específico. Como caso particular, se reporta la fabricación de un WDM 1550/1850 nm, el cual es un dispositivo poco común y de gran importancia tecnológica por su aplicación en dispositivos de fibra óptica dopada con Tulio y la generación de luz en la banda espectral de 2 micras [16-18]. Actualmente los dispositivos de fibra óptica que operan en esta banda espectral son muy limitados o se encuentran en una etapa de desarrollo. Por tal motivo, nuestra propuesta puede considerarse como una alternativa para la fabricación de componentes de fibra óptica en esta nueva banda espectral. El dispositivo final exhibe bajas pérdidas por inserción (0.17 dB), un espaciamiento entre canales de 303.52 nm, y ancho de banda de  $\pm 50$  nm.

## 2. Acopladores de fibra óptica

El arreglo experimental para la fabricación de acopladores de fibra óptica se muestra en la Fig. 1(a). En este esquema dos fibras monomodo estándar (Corning SMF-28) se fijan de forma paralela sobre dos estaciones motorizadas de traslación. El proceso de fabricación inicia cuando la flama, compuesta por una mezcla de oxígeno y butano, realiza un recorrido longitudinal hacia adelante y atrás en la sección de fibra que se desea fusionar. Simultáneamente, las estaciones de traslación estiran los extremos de las fibras fusionándolas y estrechándolas. Al término del proceso de estiramiento, el acoplador tiene

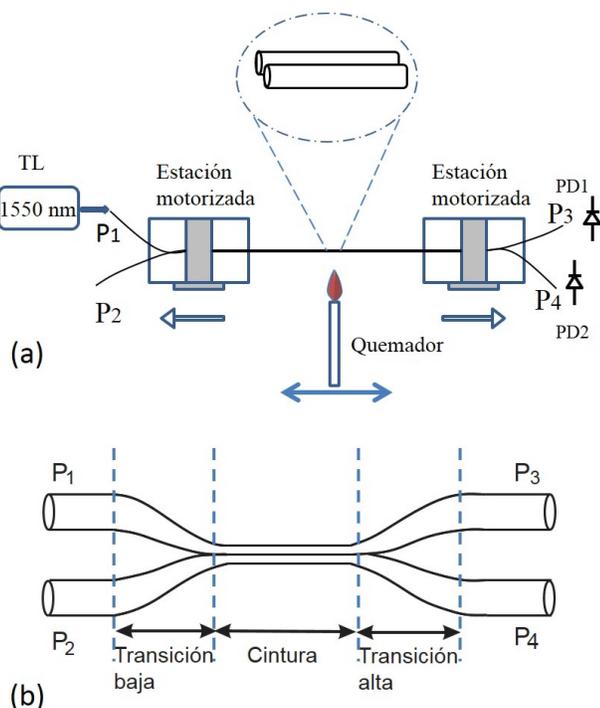


FIGURA 1. (a) Arreglo experimental para la fabricación de acopladores bicónicos de fibra óptica. (b) Esquema de un acoplador bicónico al final del proceso de fabricación.

una estructura compuesta por dos regiones de transición bicónicas unidas por una sección de fibra uniforme (cintura), como se ilustra en la Fig. 1(b).

Con el propósito de monitorear el proceso de fabricación, un láser sintonizable (TL, tunable laser) que emite a 1550 nm se conecta a la entrada del puerto  $P_1$ , y la luz transmitida es detectada por dos fotodiodos conectados a los puertos  $P_3$  y  $P_4$  del acoplador. La señal transmitida es monitoreada en tiempo real en un osciloscopio estándar durante el proceso de estiramiento. La Fig. 2(a) muestra el acoplamiento cruzado de la señal transmitida en el puerto  $P_4$ . Esta gráfica, comúnmente referida como firma de estiramiento, provee información básica para determinar la longitud de estiramiento y posteriormente poder fabricar un acoplador con una razón de acoplamiento específica. Los parámetros del acoplador tales como sección transversal, longitud de las transiciones y longitud de cintura, se obtienen a través de un modelo bien

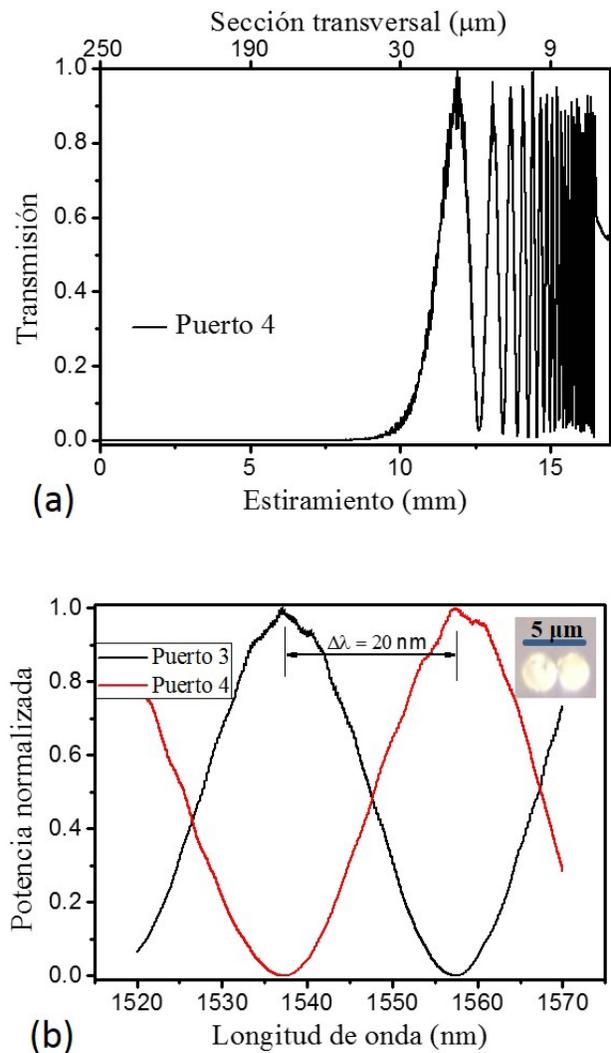


FIGURA 2. (a) Acoplamiento de energía en el puerto  $P_4$  del acoplador (firma de estiramiento). (b) Respuesta espectral del acoplador al final del proceso de fabricación. El recuadro muestra un corte transversal de la cintura mostrando un ancho de 5  $\mu\text{m}$ .

definido para fabricar fibras estrechadas [19]. Para el caso mostrado en la Fig. 2, el acoplador se fabricó manteniendo un perfil exponencial en sus transiciones (longitud total 18.2 mm de largo), una cintura uniforme de 4 mm de longitud, y una sección transversal de 5  $\mu\text{m}$ . La respuesta espectral del dispositivo se muestra en la Fig. 2(b), donde se puede precisar un espaciamento entre canales ( $\Delta\lambda$ ) de 20 nm. El recuadro de la Fig. 2(b) muestra la imagen de microscopio de un corte transversal en la cintura del acoplador, la cual posee un ancho de 5  $\mu\text{m}$  y revela una estructura muy similar a la de dos cilindros en contacto, lo que indica una sección transversal débilmente fusionada [20-22].

La transmisión del acoplador depende fuertemente de la interacción entre los modos simétrico y antisimétrico en la estructura del acoplador [23]. Al viajar estos modos con diferentes constantes de propagación, la transferencia de energía varía según la diferencia de fase acumulada. Por lo tanto, para que exista una transferencia total de energía entre un puerto y otro, debe existir una diferencia de fase de  $\pm\pi/2$  entre los modos. Esta transferencia de energía ocurre lentamente para los primeros ciclos de acoplamiento, y se intensifica conforme el acoplador reduce su sección transversal, ver Fig. 2(a). Este proceso, el cual se mostrará más adelante, está estrechamente vinculado con el espaciamento entre canales  $\Delta\lambda$ . Por lo tanto, con un diseño adecuado el acoplador puede funcionar como un componente WDM. Basados en esta motivación, y con el propósito de obtener una expresión de interés práctico para la fabricación de WDMs, en la siguiente sección se analiza la relación entre los ciclos de acoplamiento y el espaciamento entre canales.

### 3. Coeficiente de acoplamiento y espaciamento entre canales

Para el caso de un acoplador débilmente fusionado, con una estructura compuesta por dos fibras ópticas en contacto, ver recuadro en la Fig. 2(b). La constante de acoplamiento se puede expresar por la siguiente ecuación [24]:

$$C = \frac{(2\Delta)^{1/2} U^2 K_0(Wd/r)}{r V^3 K_1^2(W)} \quad (1)$$

donde  $r$  es el radio del centro al revestimiento de la fibra,  $d$  es la separación centro a centro de las fibras en contacto, y  $K_0$  y  $K_1$  son funciones de Bessel modificadas de segundo tipo de orden 0 y 1, respectivamente. Los parámetros  $U$ ,  $V$ ,  $W$ , y  $\Delta$  se definen de la siguiente forma,

$$U = r(k^2 n_2^2 - \beta^2)^{1/2}, \quad (2)$$

$$V = kr(n_2^2 - n_3^2)^{1/2}, \quad (3)$$

$$W = r(\beta^2 - k^2 n_3^2)^{1/2}, \quad (4)$$

$$\Delta = (n_2^2 - n_3^2)/2n_2^2, \quad (5)$$

donde  $n_2$  es el índice de refracción del revestimiento de la fibra,  $n_3$  es el índice de refracción del medio externo,  $\beta$  es la

constante de propagación,  $\lambda$  es la longitud de onda óptica y  $k = 2\pi/\lambda$ . En estas expresiones, puesto que el diámetro en la fibra decae a valores muy pequeños en el acoplador, típicamente menores a 20  $\mu\text{m}$ , el revestimiento puede ser considerado como el núcleo de la guía de onda, y el aire como el revestimiento. Bajo esta consideración, la constante de acoplamiento puede aproximarse a la siguiente expresión [25]:

$$C \cong \frac{2}{r} \left( \frac{\Delta}{\pi D} \right)^{1/2} \frac{U_\infty}{V^{5/2} e^{V(D-2)}}, \quad (6)$$

donde,  $D = d/r$  y  $U_\infty = 2.405$ .

La transferencia de energía entre los puertos  $P_3$  y  $P_4$  en el acoplador está determinada por las siguientes ecuaciones,

$$P_3 = P_0 \cos^2(CL), \quad (7)$$

$$P_4 = P_0 \sin^2(CL), \quad (8)$$

donde  $P_0$  es la potencia de entrada en el puerto  $P_1$  y  $L$  es la longitud de interacción. Estas ecuaciones nos indican que un

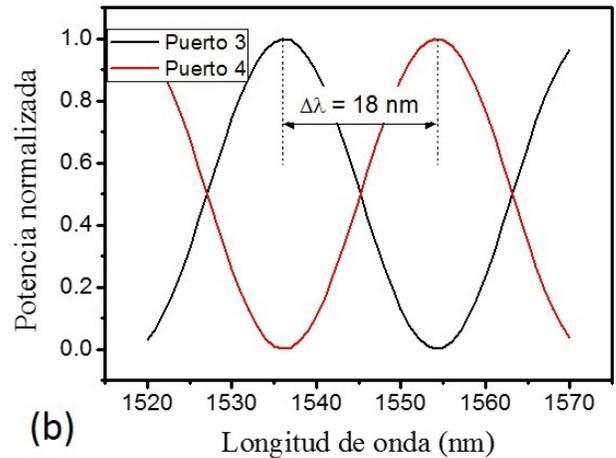
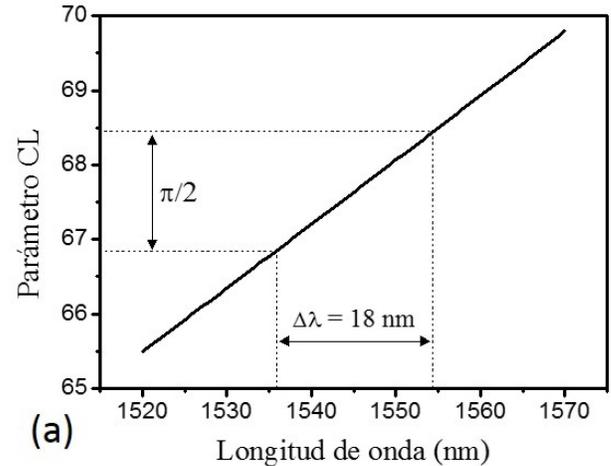


FIGURA 3. (a) Dependencia espectral del parámetro  $CL$ . (b) Respuesta espectral del acoplador. Ambas simulaciones se realizaron considerando un acoplador con diámetro final de 5  $\mu\text{m}$  y una longitud  $L$  en la cintura de 4 mm.

factor  $CL = \pi/2$  produce una máxima transferencia de energía entre los puertos  $P_3$  y  $P_4$  del acoplador. Por lo tanto, podemos asociar el número de máximos y mínimos en la transmisión con la diferencia de fase acumulada entre los modos, esto es  $CL = N\pi/2$ , donde  $N$  es un entero positivo que corresponde al  $n$ -ésimo ciclo de acoplamiento. Por ciclo de acoplamiento consideramos un cambio de máximo a mínimo en transmisión, o viceversa. La dependencia espectral del parámetro  $CL$  se muestra en la Fig. 3(a), la cual se calculó tomando como referencia las condiciones de fabricación del acoplador mostrado en la Fig. 2(b). Además, para este acoplador específico el cual está constituido por dos fibras idénticas, la constante de propagación  $\beta$  dependiente del índice de refracción efectivo y de la longitud de onda de entrada se estimó en  $5.71 \times 10^6 \text{ m}^{-1}$ . La Fig. 3(b) muestra la correspondiente transmisión espectral, donde se observa una buena concordancia con el experimento, exhibiendo un espaciado entre canales  $\Delta\lambda$  de 18 nm.

Como se aprecia en la Fig. 3(a), el parámetro  $CL$  tiene una dependencia lineal, la cual nos permite aproximar una expresión que relacione espaciado entre canales  $\Delta\lambda$  y el número de ciclos  $N$ . En un WDM la diferencia de fase correspondiente al espaciado entre canales (ver Fig. 3) obedece a la siguiente expresión,

$$|C(\lambda_2)L - C(\lambda_1)L| = \frac{\pi}{2}, \quad (9)$$

donde  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  representan la longitud del canal 1 y 2, respectivamente. La Ec. (9), puesto que existe una dependencia lineal del parámetro  $CL$ , se puede reescribir en función de la derivada  $\partial C/\partial\lambda_1$  de la siguiente forma

$$\frac{\pi}{2} \approx \frac{\partial C}{\partial\lambda_1} L\Delta\lambda = \frac{5}{2} \frac{C}{\lambda_1} L\Delta\lambda, \quad (10)$$

despejando  $\Delta\lambda$ , y tomando en cuenta la diferencia de fase acumulada  $CL = N\pi/2$ , se obtiene la siguiente expresión que relaciona el espaciado entre canales y número de ciclos  $N$

$$\Delta\lambda = \frac{2}{5} \frac{\lambda_1}{N}, \quad (11)$$

la Ec. (11) permite determinar el espaciado entre canales  $\Delta\lambda$  de un WDM en función de los ciclos de acoplamiento a la longitud de onda de fabricación ( $\lambda_1$ ). Por ejemplo, con una longitud de onda de fabricación  $\lambda_1 = 1550 \text{ nm}$ , y un espaciado entre canales  $\Delta\lambda$  de 300 nm, se deduce un valor de  $N$  igual a 2.05, lo que nos indica una detención del proceso de fabricación cuando la transmisión coincide con el segundo ciclo de acoplamiento. En la siguiente sección se analiza este proceso experimentalmente con la fabricación de un WDM 1550/1850 nm.

#### 4. Resultados experimentales y discusión

Los parámetros necesarios para la fabricación de un WDM dependen principalmente del espaciado entre canales requerido y de la longitud de onda de fabricación utilizada. De

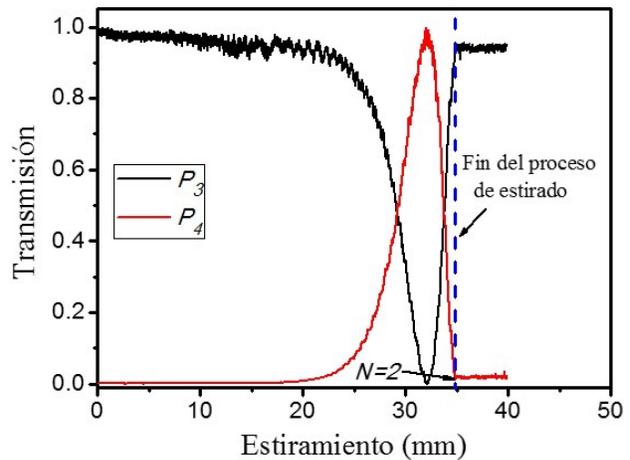


FIGURA 4. Proceso de fabricación deteniendo el proceso en  $N = 2$ .

esta manera, en la sección anterior se determinó que para fabricar un WDM 1550/1850 nm el proceso de estiramiento debe ser detenido cuando la transferencia de energía alcance el segundo ciclo de acoplamiento, es decir  $N = 2$ . Bajo este análisis, se fabricó un acoplador que muestra como resultado la firma de estiramiento de la Fig. 4, en la cual se observa una razón de acoplamiento de 94/1 y pérdidas de inserción al final del proceso estimadas en 0.17 dB. Al final del proceso de fabricación las dimensiones físicas del dispositivo son: una longitud total de 36.3 mm, una cintura de 6.5 mm con una sección transversal de  $23 \mu\text{m}$ , además con el propósito de evitar reflexiones no deseadas, se realiza un corte en un ángulo de  $8^\circ$  al puerto  $P_2$  del acoplador.

Para motivos de comparación, la Tabla I muestra los parámetros de fabricación de algunos WDMs reportados en la literatura, todos ellos han sido fabricados mediante la técnica de fusión y estiramiento. Sin embargo, es importante señalar que estos dispositivos fueron diseñados para operar en la longitud de onda de 1310/1550 nm.

TABLA I. Parámetros de fabricación de algunos WDMs reportados en la literatura.

| Autor, Ref                          | Longitud de onda de operación | Longitud total | Longitud de cintura | Sección transversal |
|-------------------------------------|-------------------------------|----------------|---------------------|---------------------|
| M. Eisenmann <i>et al</i> ; [14]    | 1310/1550 nm                  | 15 mm          | 5 mm                | -                   |
| M.N. McLandrich <i>et al</i> ; [15] | 1310/1550 nm                  | 30 mm          | 9.5 mm              | 11 $\mu\text{m}$    |
| J. Teng <i>et al</i> ; [25]         | 1310/1550 nm                  | 17 mm          | 4 mm                | 28 $\mu\text{m}$    |
| Y. Takeuchi [26]                    | 1310/1550 nm                  | 27.6 mm        | -                   | 40.9 $\mu\text{m}$  |

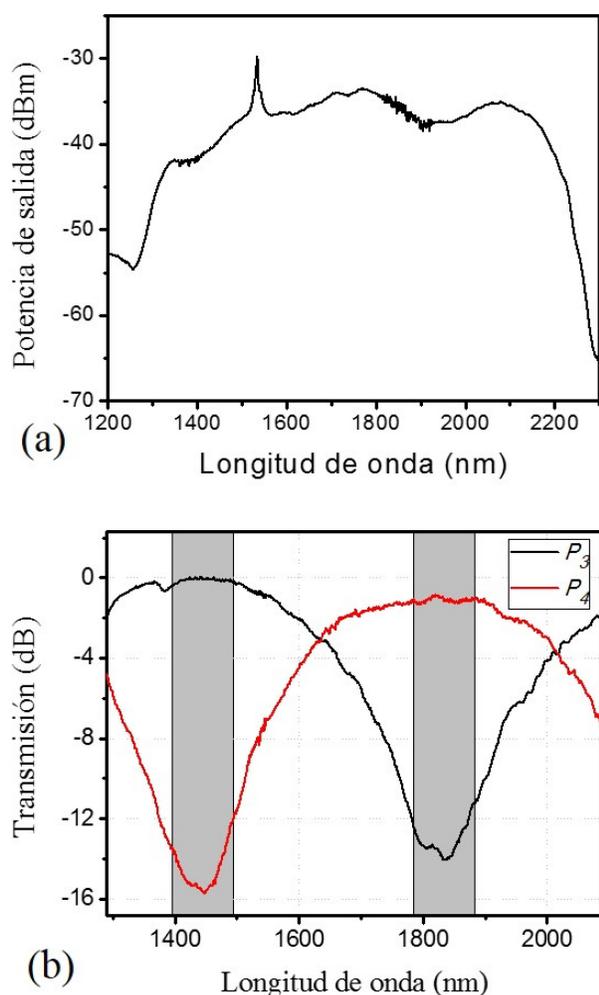


FIGURA 5. (a) Respuesta espectral de la fuente de SC usada para caracterizar el WDM. (b) Respuesta espectral del WDM.

Para realizar la caracterización de la respuesta espectral del WDM se utilizó una fuente de supercontinuo (SC) con un ancho espectral que abarca de 1200 a 2200 nm. El espectro de la fuente se muestra en la Fig. 5(a). Esta luz es introducida a través del puerto  $P_1$  del WDM y los rangos espectrales de acoplamiento se midieron de manera individual de las salidas  $P_3$  y  $P_4$  mediante un analizador de espectros ópticos (OSA, Yokogawa AQ6375), el cual mantuvo una resolución óptica en 0.1 nm durante el proceso de medición. La Fig. 5(b) muestra la respuesta espectral del WDM, donde podemos determinar la atenuación por diafonía de terminación lejana la cual es alrededor de 14 dB para esta separación de canales. El área sombreada en la gráfica indica el ancho de banda espectral para la cual los puertos  $P_3$  y  $P_4$  del WDM alcanzan las especificaciones de diseño.

Por otro lado, el dispositivo también tiene la capacidad de combinar dos longitudes de onda en un solo puerto de salida; para demostrarlo, un láser sintonizable emitiendo a 1550 nm, es conectado al puerto  $P_3$ , mientras que un láser de fibra óptica dopada de Tulio con emisión en 1854 nm, es conectado al puerto  $P_4$  del WDM. La Fig. 6 muestra la transmisión del

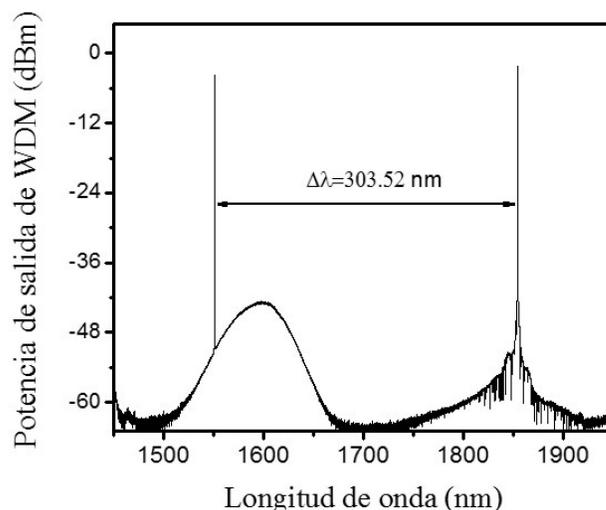


FIGURA 6. Multiplexación de 1550 y 1854 nm en el WDM.

WDM donde se observan ambas longitudes de onda con un espaciado entre canales  $\Delta\lambda \sim 303.52$  nm, ambos láseres mantienen una potencia de salida estable y balanceada de 1 mW medida en el puerto  $P_1$  del WDM.

Es importante señalar que nuestra propuesta está enfocada en el diseño de acopladores bicónicos que pueden operar eficientemente como WDMs. En particular el dispositivo caracterizado ha sido fabricado con una longitud de onda de 1550 nm, sin embargo el método puede ser válido para diferentes longitudes de onda de fabricación así como para obtener espaciados entre canales  $\Delta\lambda$  específicos. Por lo tanto, el estudio basado en acoplamiento débil ha demostrado ser una adecuada aproximación para la estimación de los parámetros de fabricación de los componentes. En adición, la acción de mantener a las fibras ópticas paralelas al momento de la fabricación, lograr una sección transversal débilmente fusionada, y tener una longitud de interacción modal corta, contribuye a que la transmisión del WDM no se vea afectada fuertemente por cambios de estados de polarización, de esta manera el dispositivo fabricado conserva el espaciado entre canales  $\Delta\lambda$  invariante.

Mediante el caso particular de la fabricación y funcionamiento estable de un WDM 1550/1850 nm, el presente trabajo puede considerarse como una guía para la fabricación de esta clase de componentes, donde su principal enfoque está orientado hacia la implementación de láseres de fibra óptica dopada de Tulio, los cuales están en etapa de desarrollo y los dispositivos disponibles para esta banda espectral son costosos y limitados. En este sentido, esta propuesta representa una alternativa para la fabricación de estos componentes los cuales exhiben importantes atributos como bajo costo de fabricación, diseño compacto, bajas pérdidas y buena estabilidad. Además, los resultados experimentales proveen información relevante para futuras optimizaciones en la fabricación y simulación de acopladores y WDMs para su implementación en láseres de fibra óptica con diversos medios de ganancia.

## 5. Conclusiones

Se presenta un método confiable que permite diseñar acopladores bicónicos de fibra óptica para su aplicación como dispositivos WDM. Mediante un análisis de acopladores débilmente fusionados se establecieron las condiciones para el proceso de fabricación. Como caso particular, presentamos un componente WDM 1550/1850 nm, el cual fue fabricado a partir de dos fibras idénticas monomodo mediante una técnica estándar de fusión y estiramiento. Al final del proceso de fabricación el WDM tuvo una longitud total de 36.3 mm, con una cintura uniforme de 6.5 mm de largo y 23  $\mu\text{m}$  de ancho,

presentando pérdidas de inserción de 0.17 dB. La respuesta espectral del dispositivo demostró un espaciado entre canales  $\Delta\lambda$  de 303.52 nm con un ancho de banda de  $\pm 50$  nm. Nuestra propuesta demuestra que los dispositivos pueden ser implementados en diseños de cavidades láser en la región de los 2000 nm.

## Agradecimientos

Este trabajo es financiado por CONACYT, proyecto Ciencia Básica N. 222476. M.V. Hernández-Arriaga agradece a CONACYT la beca posdoctoral 160021.

- 
1. K. Jedrzejewsky, *Opto-Electron. Rev.* **8** (2000) 153.
  2. X.H. Zheng, *Electron. Lett.* **22** (1986) 804.
  3. E.A.J. Marcatili, *Bell, Syst. Tech. J.* **48** (1969) 2071.
  4. D. Marcuse, *Bell, Syst. Tech. J.* **50** (1971) 1791.
  5. A. Hardy and W. Streifer, *J. Lightwave Technol.* **LT-3** (1985) 1135.
  6. S. Lacroix, F. Gonthier, and J. Bures, *Appl. Opt.* **33** (1994) 8361.
  7. K. Morishita and K. Takashina, *J. Lightwave Technol.* **9** (1991) 1503.
  8. C.W. Wu, T.L. Wu, and H.C. Chang, *IEEE Photonic. Tech. L.* **7** (1995) 786.
  9. M.S. Yataki, D.N. Payne, and M.P. Varnham, *Electron. Lett.* **21** (1985) 248.
  10. X. Fan, W. Zhou, S. Wang, X. Liu, Y. Wang, and D. Shen, *Appl. Opt.* **55** (2016) 3319.
  11. Y. Chen, Y. Semenova, G. Farrell, F. Xu, and Y.-Q. Lu, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **27** (2015) 2579.
  12. M. V. Hernández-Arriaga, M. Bello-Jiménez, A. Rodríguez-Cobos, and M.V. Andrés, *IEEE Sens. J.* **16** (2016) 132.
  13. M.V. Hernández-Arriaga, M. Bello-Jiménez, A. Rodríguez-Cobos, R. López-Estopier and M. V. Andrés, *IEEE Sens. J.* **17** (2017) 333.
  14. M. Eisenmann and E. Weidel, *J. Lightwave. Technol.* **6** (1988) 113.
  15. M.N. McLandrich, R.J. Orazi, and H.R. Marlin, *J. Lightwave. Technol.* **9** (1991) 442.
  16. P. F. Moulton *et al.*, *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.* **15** (2009) 85.
  17. A. Wienke *et al.*, *Appl. Opt.* **37** (2012) 2466.
  18. B. Posada-Ramírez *et al.*, *Opt. Exp.* **25** (2017) 2560.
  19. T.A. Birks and Y.W. Li, *J. Lightwave Technol.* **10** (1992) 432.
  20. F.P. Payne, C.D. Hussey, and M.S. Yataki, *Electron. Lett.* **21** (1985) 561.
  21. H.C. Chang, T.H. Lin, and T.L. Wu, *Appl. Opt.* **34** (1995) 6168.
  22. R. Ismaeel, T. Lee, B. Oduro, Y. Jung, and G. Brambilla, *Opt. Exp.* **22** (2014) 11610.
  23. A. Ghatak, and T. Thyagarajan, *Optical electronics*, 1st ed. (Cambridge University Press, New York, NY, 1989), pp. 609-612.
  24. A. Ankiewicz, A. Snyder, and X.-H. Zheng, *J. Lightwave Technol.* **LT-4** (1986) 1317.
  25. J. Teng *et al.*, *Opt. Fiber Technol.* **20** (2014) 239.
  26. Y. Takeuchi, *Appl. Opt.* **35** (1996) 1478.