



Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ciencias

Análisis experimental de acopladores bicónicos de fibra óptica como sensores de índice de refracción

TESIS

Para obtener el grado de

Doctor en Ciencias Aplicadas

Presenta:

M. C. Marco Vinicio Hernández Arriaga

Directores de tesis:

Dr. Miguel Ángel Bello Jiménez

Dra. Amparo Rodríguez Cobos

Enero 2016

Dedicada a mi hija

Allison Hernández Castillo

Agradecimientos

En primer lugar deseo agradecer a mis directores de tesis, los doctores Amparo Rodríguez Cobos y Miguel Ángel Bello Jiménez por todas las recomendaciones, las observaciones y por brindarme su apoyo. Al Dr. Miguel V. Andrés quien propuso el tema de tesis y contribuyó con sus recomendaciones. Simplemente gracias a ellos el proyecto logró finalizar satisfactoriamente.

También quiero agradecer a mis sinodales, a los doctores Manuel Durán Sánchez (INAOE), Rosa Elvia López Estopier (IICO), Raúl Balderas Navarro (IICO) y Gustavo Ramírez Flores (IICO), por su revisión y comentarios sobre este trabajo de tesis.

A toda mi familia, mis papas Fernando Hernández Hernández y Elvia Arriaga Hernández que siempre me inculcaron el estudio y trabajo honesto, y mis cinco hermanos Jeanne, Fernando, Myrna, Heber y Dalia por su apoyo.

Al personal que trabaja en el IICO, en la biblioteca, en el taller, a mis compañeros en los laboratorios de Fotónica y Fibras Ópticas.

También quiero agradecer a todos mis amigos que siempre me apoyaron.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico durante mis estudios de doctorado.

Resumen

El uso de acopladores bicónicos de fibra óptica en sistemas de sensado ha sido explotado en años recientes. Debido a que los acopladores poseen un fuerte campo evanescente propagándose en la cintura, lo vuelve un dispositivo altamente sensible con potencial para mejorar los niveles de sensibilidad reportados en trabajos recientes.

En este trabajo de tesis demostramos el funcionamiento del acoplador como sensor de cambios de índice de refracción (IR) de concentraciones de azúcar en agua basado en el régimen de transmisión de potencia, también proponemos una versión mejorada basada en el régimen de respuesta espectral. Esta investigación fue analizada por una simulación y comprobada de manera experimental.

Trabajando en el régimen de transmisión de potencia aportamos un esquema en el cual no es necesario el uso de equipos costosos de medición. En este esquema los cambios de IR que rodean al acoplador son percibidos como cambios en la potencia de salida. Para la obtención de valores precisos, la potencia de salida fue normalizada directamente gracias a que tenemos un dispositivo con dos puertos de salida. La sensibilidad estimada del acoplador en el régimen de transmisión de potencia fue reportada con un valor de 0.15 unidades de transmisión normalizada por unidad de concentración de azúcar (1/%). El mínimo límite de detección bajo esta configuración fue de 2.27×10^{-5} RIU (refractive index unit). Como parte de nuestra contribución mejoramos el rendimiento del dispositivo trabajándolo en el régimen de respuesta espectral logrando un mínimo límite de detección de 4.89×10^{-6} RIU.

Los resultados presentados en esta tesis demuestran que el uso de los acopladores bicónicos de fibra óptica puede ser implementado para mediciones de cambios de IR, presentando una alta resolución y confiabilidad, además de todas las ventajas de trabajar con dispositivos hechos de fibras ópticas.

Abstract

The use of fused biconical fiber couplers in sensing systems have been exploited in recent years. Because the couplers have a strong evanescent field propagating over the waist, it becomes a highly sensitive device with the potential to improve sensitivity levels reported in recently studies.

In this thesis we demonstrated the operation of the biconical coupler as a refractive index (RI) sensor for sugar concentrations in water based on the power transmission regime, we also propose an improved version based on the spectral response regime. This research was analyzed by simulation and experimentally proven.

By operating the coupler in the power transmission regime, we contributed with a scheme that is not necessary to use expensive measuring equipment. In this scheme, RI changes surrounding the coupler are perceived as changes in output power. To obtain accurate values, the output power was normalized directly because we have a device with two output ports. The estimated sensitivity of the coupler on the power transmission regime was reported with a value of 0.15 units of normalized transmission per unit of sugar concentration (1/%). The minimum detection limit was a value of 2.27×10^{-5} refractive index unit (RIU). As part of our contribution, we improve the performance of the device operating it in the spectral response regime to a minimum detection limit of 4.89×10^{-6} RIU.

The results presented in this thesis show that the use of fused biconical fiber couplers could be useful for measuring RI changes, presenting a high resolution and reliability, and all the benefits of working with devices made of optical fibers.

Índice general

<i>Agradecimientos</i>	iii
<i>Resumen</i>	iv
<i>Abstract</i>	v

Capítulo 1

Introducción general	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Motivación y objetivos del proyecto.....	4
1.3. Estructura del proyecto.....	4
1.4. Referencias.....	5

Capítulo 2

Modelado de acopladores de fibra óptica	7
2.1 Introducción.....	7
2.2 Derivación de las ecuaciones de modos acoplados basados en la teoría de perturbación.....	8
2.3 El acoplador codireccional.....	17
2.4 Derivación de los coeficientes de acoplamiento basados en interferencia modal.....	19
2.5 Coeficientes de acoplamiento para fibras ópticas.....	22
2.6 Modelado de la transferencia de energía de un acoplador cuando existe una variación de índice de refracción externo usando el software Matlab.....	27
2.7 Apéndice 2A derivación de las ecuaciones (2.7) y (2.8).....	32
2.8 Apéndice 2B soluciones exactas para las ecuaciones de modos acoplados (2.28) y (2.29).....	33
2.9 Referencias.....	35

Capítulo 3

Medición de cambios de índices de refracción usando acopladores bicónicos de fibra óptica.....	36
3.1 Introducción.....	36
3.2 Fabricación del acoplador de fibra óptica.....	38
3.3 Mediciones experimentales y discusión.....	42
3.4 Conclusiones.....	48
3.5 Referencias.....	48

Capítulo 4

Optimización de parámetros para la medición de cambios de índice de refracción usando acopladores de fibra óptica.....	52
4.1 Introducción.....	52
4.2 Modificación del arreglo experimental para la fabricación de acopladores bicónicos de fibra óptica y para la medición de índices de refracción en soluciones de azúcar en agua.....	55
4.3 Resultados experimentales y discusión.....	58
4.4 Conclusiones.....	65
4.5 Referencias.....	66

Capítulo 5

Conclusiones y trabajo futuro.....	69
5.1 Conclusiones.....	69
5.2 Trabajo futuro.....	71

Índice de figuras

Fig. 2.1. Guías de onda direccionalmente acopladas.....	9
Fig. 2.2. Representación del coeficiente de acoplamiento de base c_{12}	12
Fig. 2.3. Distribuciones de índice de refracción $N^2(x, y)$ de las guías de onda acopladas, la diferencia de las distribuciones de índice de refracción ($N^2 - N_p^2$) y el campo eléctrico E_p que aparece en las ecuaciones (2.14) y (2.16).....	13
Fig. 2.4. Variación de la potencia óptica en el acoplador direccional con $F = 1.0$	18
Fig. 2.5 Modo par (línea sólida) y modo impar (línea punteada) en una guía de onda plana de cinco niveles.....	20
Fig. 2.6. Distribución de índice de refracción de la guía de onda plana de cinco niveles.....	22
Fig. 2.7. Geometrías para el cálculo del coeficiente de acoplamiento modal. (a), (b), y (c) representa $N^2(r, \theta)$, $N_2^2(r, \theta)$ y $N^2(r, \theta) - N_2^2(r, \theta)$, respectivamente.....	25
Fig. 2.8. Sistema coordenado para la integración de $E_1^* \cdot E_2$	26
Fig. 2.9. Relación transmisión de potencia y longitud de estiramiento para un acoplador de 8.8 mm de largo. Mientras más grande sea la longitud de estiramiento los ciclos de acoplamiento se vuelven más rápidos.....	27
Fig. 2.10. Simulación del intercambio de energía en un acoplador de fibra óptica cuando existen variaciones en el IR externo. Se simula un acoplador de 11 mm de estiramiento y un diámetro de cintura de 24 μm	32
Fig. 3.1. Máquina para la fabricación de fibras ópticas estrechadas por fusión y estiramiento, (MFFOE).....	39
Fig. 3.2. Arreglo experimental para la fabricación de acopladores bicónicos de fibras ópticas por fusión y estiramiento.....	41
Fig. 3.3. (a) Variación de la potencia como una función de la longitud de estiramiento (firma de estiramiento). (b) Perfil de diámetro del acoplador bicónico de fibra óptica.....	42

Fig. 3.4. Arreglo experimental para el monitoreo de concentraciones de azúcar en soluciones acuosas.....	43
Fig. 3.5. Puntos de operación usados para determinar el funcionamiento del acoplador como sensor de IR. El recuadro muestra una sección transversal débilmente fusionada para el acoplador en el punto A.....	44
Fig. 3.6. Variación de la potencia normalizada de salida para tres acopladores trabajando en diferentes puntos de sensado. (a) Punto de sensado (A), (b) Punto de sensado (B), y (c) Punto de sensado C. Las concentraciones de soluciones de azúcar fueron variadas en el rango de 0 a 55 % (gramos de soluto en 100ml de agua deionizada).....	45
Fig. 3.7. Respuesta de transmisión para el acoplador en el punto D. (a) Altas concentraciones de soluciones de azúcar. (b) Bajas concentraciones de soluciones de azúcar.....	46
Fig. 3.8. La sensibilidad es incrementada cuando el sensor basado en el acoplador de fibra es operado ciclos de acoplamiento posteriores a los iniciales. Los cuadrados y círculos corresponden a la sensibilidad para los puntos de sensado E y F respectivamente.....	47
Fig. 4.1. (a) Firma de estiramiento de un acoplador bicónico de fibra óptica de 23 mm de longitud y diámetro final de 1 μ m. (b) Intercambio de energía entre los puertos de salida en la parte final del proceso de fabricación.....	54
Fig. 4.2. Arreglo experimental para la fabricación de acopladores bicónicos de fibra óptica en ciclos de acoplamiento muy posteriores a los iniciales.....	56
Fig. 4.3. Arreglo experimental para la medición de variaciones de IR de concentraciones de azúcar en agua en respuesta en transmisión de potencia y en desplazamiento de longitud de onda a partir de la respuesta espectral.....	57
Fig. 4.4. Respuesta espectral en aire de un acoplador de 23mm de largo y un diámetro de 1 μ m. El ancho del periodo de los máximos es de 29 nm y el ancho a 3dB es cercano a 14.5 nm.....	58

Fig. 4.5. El desempeño de acoplador puede ser evaluado en dos tipos de codificación, 1) por desplazamiento en longitud de onda y 2) por transmisión de potencia.....	59
Fig. 4.6. Mediciones realizadas para un acoplador de 16 mm de largo con un diámetro final de 5 μ m. (a) Sensibilidad estimada de 0.11 (1%) en el régimen de transmisión de potencia. (b) Respuesta espectral para concentraciones entre 0 y 10 % ó IR de 1.333 a 1.349. (c) Sensibilidad calculada de 670 nm/RIU en desplazamiento de longitud de onda.....	61
Fig. 4.7. Mediciones realizadas para un acoplador de 17.6 mm de largo con un diámetro final de 5 μ m (a) La sensibilidad calculada en el régimen de transmisión de potencia es de 0.129 (1%). (b) Respuesta espectral para concentraciones entre 0 y 10 % ó IR de 1.333 a 1.349. (c) La sensibilidad calculada en desplazamiento de longitud de onda de 716 nm/RIU.....	62
Fig. 4.8. Mediciones para un acoplador de 21.5 mm de largo con diámetro final de 5 μ m. (a) La sensibilidad en el régimen de transmisión de potencia es de 0.458 (1%) con un límite mínimo de detección de 4.89×10^{-6} RIU. (b) Curvas de respuesta espectral para concentraciones de 0 a 10% ó IR de 1.333 a 1.349. (c) Sensibilidad mejorada en desplazamiento de longitud de onda con un valor de 1036 nm/RIU.....	64
Fig. 4.9. Mediciones para un acoplador de 21.5 mm de largo con un diámetro final de 5 μ m. (a) Respuesta espectral para concentraciones de 0 a 1 % ó IR de 1.333 a 1.3344. (b) La máxima sensibilidad lograda en desplazamiento de longitud de onda es de 2350 nm.....	65
Fig. 5.1. a) Esquema de un bio-sensor basado en el acoplador bicónico donde los anticuerpos se adhieren al acoplador por adsorción física. b) Firma de estiramiento típica de un acoplador, se sugiere trabajar en la zona de acoplamiento marcada en el recuadro azul para incrementar la sensibilidad.....	72
Fig. 5.2.- Esquema del acoplador bicónico recubierto con una capa de paladio para el sensado de hidrogeno.....	73

Lista de acrónimos

1/%	(unidades de transmisión normalizada por unidades de concentración de azúcar).
ADN	(ácido desoxirribonucleico).
CP	(control de polarización).
FWHM	Full Width at Half Maximum, (ancho total a la mitad del máximo).
IR	(índice de refracción).
Laser DFB	Distributed Feedback Laser, (Laser de retroalimentación distribuida).
MMFOE	(máquina para la fabricación de fibras ópticas estrechadas por fusión y estiramiento).
RIU	Refractive Index Unit, (unidades de índice de refracción).
TL	Tunable Laser, (laser sintonizable).
wt%	Weight, (porcentaje de peso de concentración de azúcar).

Capítulo 1

Introducción general

En este capítulo se presenta una introducción general del trabajo de tesis doctoral, titulada “*Análisis Experimental de Acopladores Bicónicos de Fibra Óptica como Sensores de Índice de Refracción,*” escrita por Marco Vinicio Hernández Arriaga y dirigida por los doctores Miguel Ángel Bello Jiménez y Amparo Rodríguez Cobos en el Instituto de Investigación en Comunicación Óptica perteneciente a la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

1.1. Introducción

Con el desarrollo de las fibras ópticas y su inclusión en los sistemas de comunicación, se han desarrollado un gran número de dispositivos ópticos basados en fibras ópticas. Entre estos dispositivos que podemos mencionar son multiplexores, filtros, acopladores, láseres, etc. En el caso de los acopladores, el principal método de fabricación se basa en un proceso bien establecido para el estrechamiento de las fibras ópticas, conocido como la técnica de *fusión y estiramiento* [1]. Esta técnica permite estrechar, mediante un estiramiento controlado de la fibra a diámetros del orden de 1 μm . Entre las ventajas que tenemos al trabajar con dispositivos hechos de fibras ópticas es su alta sensibilidad, compatibilidad con sistemas de medición de señales ópticas, tamaño compacto e inmunidad a la interferencia electromagnética externa. En el laboratorio de fibras ópticas del instituto, se cuenta con una máquina para la fabricación de fibras ópticas estrechadas por fusión y estiramiento (MFFOE), la cual controla los parámetros de operación para la fabricación de fibras ópticas estrechadas [2]. Esta máquina posee tres motores a pasos, dos que estiran la fibra en dirección opuesta y otro que mueve el quemador. En la fabricación de acopladores, dos fibras idénticas son posicionadas sobre unas bases móviles y entrelazadas entre sí, mientras una flama caliente justo en el cruce de las fibras. De esta manera se fusionan y forman un

dispositivo 2 x 2 con una parte muy delgada llamada cintura o cuello, la cual está unida a dos zonas de transición en sus extremos. Una aplicación novedosa de los acopladores de fibra óptica es como elemento sensor, estos dispositivos han sido reportados como sensores de índice de refracción (IR) [3-5], temperatura [6], humedad [7], y más recientemente en aplicaciones de bio-sensado [8, 9]. Una de las principales ventajas de los acopladores es que la luz que es introducida en el puerto de entrada se propaga a lo largo de la zona de la cintura en forma de ondas evanescentes [10, 11]. De esta forma la energía evanescente viaja en la superficie del acoplador y puede interactuar fuertemente con el medio que lo rodea. Aprovechando esta propiedad en este trabajo proponemos el uso de acopladores bicónicos para la medición de pequeños cambios de IR en soluciones acuosas.

En el análisis de la propagación de luz en un acoplador se puede asumir que los núcleos de la fibra son despreciables y la luz se propaga en una interfaz revestimiento-aire [12, 13]. Una buena aproximación para su estudio se basa en la teoría de la perturbación [14], que incluye la teoría de modos acoplados [15, 16]. De manera muy general, se dice que el efecto de acoplamiento modal en los acopladores direccionales puede ser visto como una interferencia entre los modos par (simétrico) e impar (antisimétrico) cuando la estructura compuesta por dos guías de onda se asume como una guía de onda plana de cinco capas [17].

En la parte experimental, nuestra contribución fue demostrar un sistema alternativo y eficiente basado en un acoplador bicónico de fibra óptica para la medición de cambios de IR. Para variar el índice exterior en el acoplador, una de las maneras más efectivas es usar concentraciones de azúcar en agua cuyos IR están bien caracterizados y reportados [18, 19]. Con el acoplador tuvimos la ventaja de trabajar con una estructura que posee dos puertos de salida, esto nos genera una normalización directa para eliminar las fluctuaciones de potencia en el láser, lo cual mejora significativamente el desempeño del sistema. Los cambios de IR son detectables cuando una gota de solución de azúcar es depositada sobre el acoplador, esto genera un cambio de IR en el exterior el cual es percibido como un cambio en la potencia transmitida. De esta manera al ir depositando las diversas

soluciones con diferentes IR obtuvimos una respuesta en transmisión para evaluar la sensibilidad del acoplador. Para todo sistema de sensado se espera que su responsividad sea de manera lineal. Mediante la MFFOE es posible fabricar acopladores a cualquier razón de acoplamiento; esto nos permitió encontrar de manera experimental puntos de acoplamiento donde existía una relación lineal entre la variación de la concentración de azúcar y la potencia de salida. El interés práctico fue poder sensar concentraciones de azúcar entre 0 y 5 %, en este caso, operando al acoplador en el régimen de transmisión de potencia obtuvimos una sensibilidad de 0.15 unidades de transmisión normalizada por unidades de concentración de azúcar (1/%) con un mínimo límite de detección de 0.012 porcentaje de peso de concentración de azúcar (wt%). Para propósitos de comparación con otros trabajos publicados, nuestro esquema permite un límite de detección estimado en 2.27×10^{-5} unidades de índice de refracción (RIU, refractive index unit) para IR entre 1.333 y 1.341. Una versión mejorada con una configuración que opera en el régimen de respuesta espectral fue propuesta como un segundo experimento. Para este caso, se implementó un láser sintonizable (TL) que nos permite mediante sintonización en longitud de onda seleccionar la razón de acoplamiento del dispositivo sensor. Con este arreglo tenemos la ventaja de que pequeños cambios en los IR que rodean al elemento sensor son percibidos como un desplazamiento de longitud de onda de la respuesta espectral del acoplador, pero en el mismo experimento también pueden ser estimados los valores del régimen de transmisión de potencia. Bajo este esquema, el acoplador fue operado en un punto de sensado ubicado en ciclos de acoplamiento muy posteriores a los iniciales, donde realizamos mediciones para concentraciones de azúcar entre 0 y 10 % con IR entre 1.333 y 1.349. El valor obtenido de la sensibilidad en el segundo experimento bajo el régimen de transmisión de potencia fue de 0.458 (1/%), con un límite de detección mínimo de 0.003 (wt%). La mínima variación de IR detectable se estimó en 4.89×10^{-6} RIU. La máxima sensibilidad obtenida en desplazamiento de longitud de onda fue medida en 2350 nm/RIU.

1.2. Motivación y objetivos del proyecto

Como hemos mencionado previamente, los acopladores bicónicos de fibra óptica han atraído gran interés en sistemas de medición por su alta sensibilidad y fácil integración con los sistemas ópticos. Se observó que los acopladores poseen un fuerte campo evanescente circulando por su superficie, esta propiedad nos permitió implementar un esquema alternativo para la medición de pequeños cambios de IR en soluciones acuosas. Bajo diferentes esquemas de medición, y gracias a los bajos costos de fabricación, el uso de los acopladores bicónicos de fibra óptica continua vigente en sistemas de sensado. En esta tesis, el objetivo principal es demostrar un esquema simple pero preciso para la medición de cambios de IR en concentraciones de azúcar en agua donde evitamos el uso de equipos costosos de medición. Después, en un segundo experimento incrementamos los valores de sensibilidad al operar el acoplador en ciclos de acoplamiento muy posteriores al ciclo de acoplamiento inicial, esto nos permite la fabricación de acopladores muy sensibles con gran potencial de aplicaciones como elemento sensor.

1.3. Estructura del proyecto

Este trabajo de tesis está organizado en cinco capítulos incluyendo este capítulo introductorio. El capítulo 2 presenta la parte teórica para comprender el funcionamiento de los acopladores bicónicos. Incluye un análisis basado en la teoría de perturbación, las ecuaciones obtenidas de la teoría de modos acoplados, el análisis del acoplador como una guía de cinco niveles y un programa de simulación de la variación de IR externo en un acoplador de fibra óptica desarrollado en Matlab. El capítulo 3 presenta los resultados experimentales para la medición de cambios de IR usando acopladores bicónicos de fibra óptica. Particularmente se presentan los resultados en el régimen de transmisión de potencia para concentraciones de azúcar de 0 a 5 %. Los resultados en este capítulo son estimados en valores de sensibilidad y límite de detección. En el capítulo 4 describimos un esquema

mejorado haciendo uso de un láser sintonizable, realizamos las mediciones de la respuesta espectral del acoplador para cambios en el IR en concentraciones de azúcar entre 0 y 10 %. Bajo este régimen mejoramos la sensibilidad y el límite de detección mostrados en el capítulo anterior. Por último, en el capítulo 5 se resaltan los resultados más importantes del proyecto y como trabajo futuro se proponen dos líneas de investigación sobre acopladores, una enfocada en bio-sensores y otra hacia sensores de combustibles.

1.4. Referencias

- [1] B. S. Kawasaki, K. O. Hill, and R. G. Lamont, "Biconical-taper single-mode fiber coupler," *Opt. Lett*, vol. 6, no. 7, pp. 327-328, 1981.
- [2] T. A. Birks, Y. W. Li, "The shape of fiber tapers," *J. Lightwave. Technol*, vol. 10, no. 4, pp. 432-438, Apr 1992.
- [3] L. Bo, P. Wang, Y. Semenova, and G. Farrell, "High Sensitivity Fiber Refractometer Based on an Optical Microfiber Coupler," *IEEE Photonic. Tech. L*, vol. 25, no. 3, pp. 228-230, Feb. 2013.
- [4] Z. Chen, J. Shi, P. Fufei, and W. Tingyun, "Measuring liquid-refractive- index based on a fused fiber-optic coupler," in *Proc. Inst. Eng. Technol. Conf. Wireless, Mobile and Sensor Networks*, 2007, pp. 893-896.
- [5] C. R. Liao, D. N. Wang, X. He, and M. W. Yang, "Twisted optical microfibers for refractive index sensing," *IEEE Photonic. Tech. L*, vol. 23, no. 13, pp. 848–850, Jul. 2011.
- [6] P. Wang, M. Ding, G. Brambilla, Y. Semenova, Q. Wu and G. Farrell, "High temperature performance of an optical microfibre coupler and its potential use as a sensor," *Electron. Lett*, vol. 48, no. 5, pp. 283-284, Mar. 2012.
- [7] L. Bo, P. Wang, Y. Semenova, and G. Farrell, "Optical microfiber coupler based humidity sensor with a polyethylene oxide coating," *Microw. Opt. Techn. Lett*, vol. 57, no. 2, pp. 457-459, Feb. 2015.

- [8] T. Tazawa, T. Kanie, and M. Katayama, "Fiber-optic coupler based refractive index sensor and its application to biosensing," *Appl. Phys. Lett*, vol. 91, pp. 113901–113903, Sep. 2007.
- [9] L. Bo, C. C. O'Mahony, Y. Semenova, N. Gilmartin, P. Wang, and G. Farrell, "Microfiber coupler based label-free immunosensor," *Opt. Express*, vol. 22, no. 7, pp. 8150-8155, Apr. 2014.
- [10] F. P. Payne, R. Finegan, M. S. Yataki, R. J. Mears, and C. D. Hussey, "Dependence of fused taper couplers on external refractive index," *Electron. Lett*, vol. 22, no. 22, pp. 1207–1209, Oct. 1986.
- [11] K. O. Hill, D. C. Jhonson, R. C. Lamont "Efficient coupling-ratio control in single-mode-fiber biconical taper", *Technical Digest, Conference on Optical Fiber Communication, OSA, WE2*, 1984.
- [12] S. E. Moore, W. F. Gasco and D. W. Stove, "Mass production of fused couplers and couplers based devices" *SPIE Proc., Fiber Optic Couplers, Connectors and Splice Technology 2*, Vol. 574, pp. 135-140, 1985.
- [13] W. K. Burns, M. Abebe, C. A. Villarruel and R. P. Moeller, "Loss mechanisms in single-mode fiber tapers", *IEEE J. Lightwave Tech.*, LT- 4, pp. 608-612, 1986.
- [14] Marcuse, D, "Light Transmission Optics," New York: Van Nostrand Reinhold, 1972.
- [15] Hardy, A., and W. Streifer, "Coupled-mode theory of parallel waveguides", *IEEE J. Lightwave Tech.* LT-3, pp. 1135–1147, 1985.
- [16] Marcatili, E. A. J, "Improved coupled-mode equations for dielectric guides", *IEEE J. Quantum Electron.* QE-22, pp. 988–993, 1986.
- [17] Marcuse, D, "Theory of Dielectric Optical Waveguides", New York: Academic Press, 1974.
- [18] W. M. Yunus, A. A. Rahman, "Refractive index of solutions at high concentrations." *Appl. Optics*, vol. 27, no. 16, pp. 3341-3343, Aug 1988.
- [19] L. Jiang, L. Zhao, S. Wang, J. Yang and H. Xiao, "Femtosecond laser fabricated all-optical fiber sensors with ultrahigh refractive index sensitivity: modeling and experiment," *Opt. Express*, vol. 19, no. 18, pp. 17591-17598, Aug. 2011.

Capítulo 2

Modelado de acopladores de fibra óptica

En este capítulo se presentan las bases teóricas para analizar la transferencia de energía en los acopladores de fibra óptica. Partiendo de las ecuaciones de Maxwell, se derivan las ecuaciones de modos acoplados mediante la teoría de perturbación. Esta teoría es fundamental para comprender el fenómeno físico que se presenta en la transferencia de energía de los acopladores. También se presenta una simulación en Matlab para un acoplador de fibra óptica que es rodeado por un índice de refracción (IR) variante.

2.1. Introducción

Los acopladores de fibra óptica son dispositivos importantes que típicamente están contruidos por dos puertos de entrada y dos puertos de salida, de esta manera la potencia de entrada puede ser distribuida hacia los dos puertos de salida del acoplador. Dependiendo de su aplicación los acopladores pueden ser fabricados con una razón de acoplamiento específica.

El método más común para la fabricación de acopladores de fibra óptica emplea una técnica estándar de fusión y estiramiento [1], en donde dos fibras ópticas son fusionadas formando una estructura de cuatro puertos; dicha estructura comprende una zona adelgazada llamada cintura y dos regiones de transición ubicadas en los extremos del acoplador. En el proceso de fabricación, la luz es introducida a uno de los puertos de entrada del acoplador y, simultáneamente se monitorea en tiempo real la potencia transmitida mientras que las fibras son fusionadas y estrechadas. Durante este proceso se observa como la transferencia de energía entre los puertos de salida puede ir de un máximo a un mínimo, permitiendo una razón de acoplamiento específica. La transferencia de energía toma lugar en la región de interacción que tiene una estructura longitudinal y será analizada a través de la teoría de modos acoplados en este capítulo con sus ecuaciones desarrolladas en el

apéndice 2A y 2B [2]. La principal característica del acoplador bicónico es que la luz acoplada en el puerto de entrada es propagada en forma de energía evanescente a lo largo de la zona de la cintura, provocando una interacción importante de la energía propagante con el medio circundante, entonces, las variaciones de los IR que rodean al acoplador afectan sensiblemente la propagación de la energía evanescente. Aprovechando este atributo del acoplador, hemos demostrado su aplicación como sensor de cambios de IR para concentraciones de azúcar. Su funcionamiento y caracterización se explica ampliamente en los siguientes capítulos.

En este capítulo se describe el desarrollo de la teoría de modos acoplados basado en la teoría de la perturbación, se analiza la parte teórica para los acopladores codireccionales y se demuestra la parte teórica para la derivación de los coeficientes de acoplamiento basado en la interferencia modal para una guía de onda plana de cinco niveles y también para un acoplador de fibra óptica. También se discute el modelado de la transferencia de energía de un acoplador bicónico de fibra óptica cuando existe una variación del IR externo usando el software Matlab.

2.2. Derivación de las ecuaciones de modos acoplados basados en la teoría de perturbación.

Se conoce que en guías de onda ópticas axialmente uniformes, existen cierto número de modos de propagación. Esta propagación de modos es específica para cada guía de onda y satisfacen las condiciones de ortogonalidad entre ellos. Si dos guías son acercadas lo suficiente como se muestra en la Fig. 2.1, los modos ópticos de cada guía se acoplan entre sí.

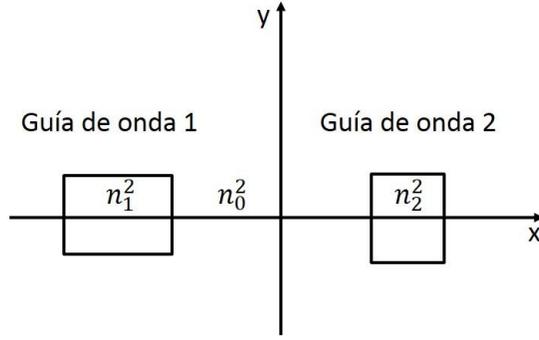


Fig. 2.1. Guías de onda direccionalmente acopladas.

El análisis de la propagación en guías de onda acopladas por el método de perturbación [3], puede ser utilizado cuando en el acoplamiento de modos no existen cambios substanciales en las distribuciones del campo electromagnético.

Cuando denotamos los eigenmodos en cada guía óptica antes del acoplamiento modal como $\tilde{\mathbf{E}}_p, \tilde{\mathbf{H}}_p$ ($p = 1, 2$), estos satisfacen las siguientes ecuaciones de Maxwell:

$$\begin{cases} \nabla \times \tilde{\mathbf{E}}_p = -j\omega\mu_0\tilde{\mathbf{H}}_p \\ \nabla \times \tilde{\mathbf{H}}_p = j\omega\varepsilon_0 N_p^2 \tilde{\mathbf{E}}_p \end{cases}, \quad (p = 1, 2) \quad (2.1)$$

Aquí j denota una amplitud compleja donde ω es la frecuencia angular de los campos electromagnéticos variando sinusoidalmente en el tiempo, μ_0 y ε_0 son la permeabilidad y permitividad del medio en el vacío, la tilde “~” en $\tilde{\mathbf{E}}_p, \tilde{\mathbf{H}}_p$ significa que son los campos eléctrico y magnético para un medio dieléctrico homogéneo y sin pérdidas, mientras que $N_p^2(x, y)$ representa la distribución de IR de cada guía de onda, el subíndice p denota la existencia de dos modos ortogonalmente polarizados, $p=1$ corresponde al modo \mathbf{HE}_{11}^x y $p=2$ al modo \mathbf{HE}_{11}^y respectivamente.

Los campos electromagnéticos de la guía de onda acoplada pueden ser expresados como la suma de los eigenmodos en cada guía de onda:

$$\begin{cases} \tilde{\mathbf{E}} = A(z)\tilde{\mathbf{E}}_1 + B(z)\tilde{\mathbf{E}}_2 \\ \tilde{\mathbf{H}} = A(z)\tilde{\mathbf{H}}_1 + B(z)\tilde{\mathbf{H}}_2 \end{cases}. \quad (2.2)$$

Denotamos con $A(z)$ y $B(z)$ las amplitudes de los eigenmodos $\tilde{\mathbf{E}}_p$ y $\tilde{\mathbf{H}}_p$. Los campos electromagnéticos en la guía de onda acoplada $\tilde{\mathbf{E}}$ y $\tilde{\mathbf{H}}$ deben satisfacer las ecuaciones de Maxwell. Entonces substituyendo la ecuación (2.2) en

$$\begin{cases} \nabla \times \tilde{\mathbf{E}} = -j\omega\mu_0\tilde{\mathbf{H}} \\ \nabla \times \tilde{\mathbf{H}} = j\omega\varepsilon_0 N^2 \tilde{\mathbf{E}}, \end{cases} \quad (2.3)$$

y usando la ecuación (2.1) con la siguiente identidad vectorial,

$$\nabla \times (A\mathbf{E}) = A\nabla \times \mathbf{E} + \nabla A \times \mathbf{E} = A\nabla \times \mathbf{E} + \frac{dA}{dz} \mathbf{u}_z \times \mathbf{E}, \quad (2.4)$$

donde \mathbf{u}_z es un vector unitario en dirección z .

Obtenemos las siguientes relaciones para el campo electromagnético en $\tilde{\mathbf{E}}$

$$(\mathbf{u}_z \times \tilde{\mathbf{E}}_1) \frac{dA}{dz} + (\mathbf{u}_z \times \tilde{\mathbf{E}}_2) \frac{dB}{dz} = 0, \quad (2.5)$$

y para el campo electromagnético en $\tilde{\mathbf{H}}$ tenemos:

$$(\mathbf{u}_z \times \tilde{\mathbf{H}}_1) \frac{dA}{dz} - j\omega\varepsilon_0(N^2 - N_1^2)A\tilde{\mathbf{E}}_1 + (\mathbf{u}_z \times \tilde{\mathbf{H}}_2) \frac{dB}{dz} - j\omega\varepsilon_0(N^2 - N_2^2)B\tilde{\mathbf{E}}_2 = 0. \quad (2.6)$$

Aquí, $N^2(x, y)$ denota la distribución de índice de refracción en la guía acoplada entera. Al substituir las ecuaciones (2.5) y (2.6) en las siguientes ecuaciones integrales:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [\tilde{\mathbf{E}}_1^* \cdot (2.6) - \tilde{\mathbf{H}}_1^* \cdot (2.5)] dx dy = 0, \quad (2.7)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [\tilde{\mathbf{E}}_2^* \cdot (2.6) - \tilde{\mathbf{H}}_2^* \cdot (2.5)] dx dy = 0, \quad (2.8)$$

Obtenemos, (véase Apéndice 2A al final del capítulo)

$$\begin{aligned} \frac{dA}{dz} + \frac{dB}{dz} \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{u}_z \cdot (\tilde{\mathbf{E}}_1^* \times \tilde{\mathbf{H}}_2 + \tilde{\mathbf{E}}_2 \times \tilde{\mathbf{H}}_1^*) dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{u}_z \cdot (\tilde{\mathbf{E}}_1^* \times \tilde{\mathbf{H}}_1 + \tilde{\mathbf{E}}_1 \times \tilde{\mathbf{H}}_1^*) dx dy} + jA \frac{\omega\varepsilon_0 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (N^2 - N_1^2) \tilde{\mathbf{E}}_1^* \cdot \tilde{\mathbf{E}}_1 dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{u}_z \cdot (\tilde{\mathbf{E}}_1^* \times \tilde{\mathbf{H}}_1 + \tilde{\mathbf{E}}_1 \times \tilde{\mathbf{H}}_1^*) dx dy} \\ + jB \frac{\omega\varepsilon_0 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (N^2 - N_2^2) \tilde{\mathbf{E}}_2^* \cdot \tilde{\mathbf{E}}_2 dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{u}_z \cdot (\tilde{\mathbf{E}}_1^* \times \tilde{\mathbf{H}}_1 + \tilde{\mathbf{E}}_1 \times \tilde{\mathbf{H}}_1^*) dx dy} = 0 \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} \frac{dB}{dz} + \frac{dA}{dz} \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{u}_z \cdot (\tilde{\mathbf{E}}_2^* \times \tilde{\mathbf{H}}_1 + \tilde{\mathbf{E}}_1 \times \tilde{\mathbf{H}}_2^*) dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{u}_z \cdot (\tilde{\mathbf{E}}_2^* \times \tilde{\mathbf{H}}_2 + \tilde{\mathbf{E}}_2 \times \tilde{\mathbf{H}}_2^*) dx dy} + jA \frac{\omega \varepsilon_0 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (N^2 - N_1^2) \tilde{\mathbf{E}}_2^* \cdot \tilde{\mathbf{E}}_1 dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{u}_z \cdot (\tilde{\mathbf{E}}_2^* \times \tilde{\mathbf{H}}_2 + \tilde{\mathbf{E}}_2 \times \tilde{\mathbf{H}}_2^*) dx dy} \\ + jB \frac{\omega \varepsilon_0 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (N^2 - N_1^2) \tilde{\mathbf{E}}_2^* \cdot \tilde{\mathbf{E}}_2 dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{u}_z \cdot (\tilde{\mathbf{E}}_2^* \times \tilde{\mathbf{H}}_2 + \tilde{\mathbf{E}}_2 \times \tilde{\mathbf{H}}_2^*) dx dy} = 0. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Aquí separamos las dependencias axial y transversal de los campos electromagnéticos:

$$\begin{cases} \tilde{\mathbf{E}}_p = \mathbf{E}_p \exp(-j\beta_p z) \\ \tilde{\mathbf{H}}_p = \mathbf{H}_p \exp(-j\beta_p z) \end{cases}, \quad (\rho = 1, 2) \quad (2.11)$$

Donde β_p son las constantes de propagación en las dos guías. Después, substituyendo la ecuación (2.11) en las ecuaciones (2.9) y (2.10), obtenemos las siguientes ecuaciones

$$\frac{dA}{dz} + c_{12} \frac{dB}{dz} \exp[-j(\beta_2 - \beta_1)z] + j\chi_1 A + j\kappa_{12} \beta \exp[-j(\beta_2 - \beta_1)z] = 0 \quad (2.12)$$

$$\frac{dB}{dz} + c_{21} \frac{dA}{dz} \exp[+j(\beta_2 - \beta_1)z] + j\chi_2 B + j\kappa_{21} \beta \exp[-j(\beta_2 - \beta_1)z] = 0. \quad (2.13)$$

Donde

$$\kappa_{pq} = \frac{\omega \varepsilon_0 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (N^2 - N_q^2) \mathbf{E}_p^* \cdot \mathbf{E}_q dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{u}_z \cdot (\mathbf{E}_p^* \times \mathbf{H}_p + \mathbf{E}_p \times \mathbf{H}_p^*) dx dy} \quad (2.14)$$

$$c_{pq} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{u}_z \cdot (\mathbf{E}_p^* \times \mathbf{H}_q + \mathbf{E}_q \times \mathbf{H}_p^*) dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{u}_z \cdot (\mathbf{E}_p^* \times \mathbf{H}_p + \mathbf{E}_p \times \mathbf{H}_p^*) dx dy} \quad (2.15)$$

$$\chi_p = \frac{\omega \varepsilon_0 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (N^2 - N_p^2) \mathbf{E}_p^* \cdot \mathbf{E}_p dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{u}_z \cdot (\mathbf{E}_p^* \times \mathbf{H}_p + \mathbf{E}_p \times \mathbf{H}_p^*) dx dy} \quad (2.16)$$

donde p y q son $(p, q) = (1, 2)$ ó $(2, 1)$, respectivamente. κ_{pq} es el coeficiente de acoplamiento del modo del acoplador direccional. c_{pq} es el coeficiente de acoplamiento de base [4, 5], para un arreglo de guías de onda como las mostradas

en la Fig. 2.2. En este arreglo, la guía de onda 1 existe solo en la región $z < 0$ y la guía de onda 2 en $z \geq 0$. Cuando el eigenmodo $(\mathbf{E}_1, \mathbf{H}_1)$ de la guía de onda 1 se propaga de la dirección z negativa a $z = 0$, el campo electromagnético en el cladding excita el eigenmodo $(\mathbf{E}_2, \mathbf{H}_2)$ en el punto $z = 0$. Este coeficiente de acoplamiento es considerado c_{12} . Por otra parte, χ_p es también un coeficiente del acoplamiento del modo del acoplador bajo el siguiente criterio.

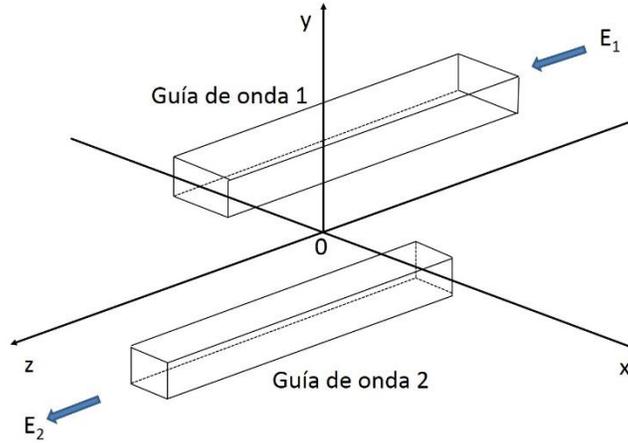


Fig. 2.2. Representación del coeficiente de acoplamiento de base c_{12} .

Comparando las magnitudes de κ_{pq} y χ_p para los casos cuando $p=1$ y $p=2$. Como se muestra en la Fig. 2.3 (c), el valor de $(N^2 - N_2^2)$ en la guía de onda 1 es igual a $(n_1^2 - n_0^2)$ y vale cero para las demás regiones. Entonces la integral de κ_{12} solamente es válida para la región del núcleo en la guía de onda 1. El campo eléctrico \mathbf{E}_2 dentro de la guía de onda 1 (lo denotamos como $|\mathbf{E}_2| = \eta|\mathbf{E}_1|$ introduciendo un factor η) es un poco menor comparado con el campo eléctrico \mathbf{E}_1 .

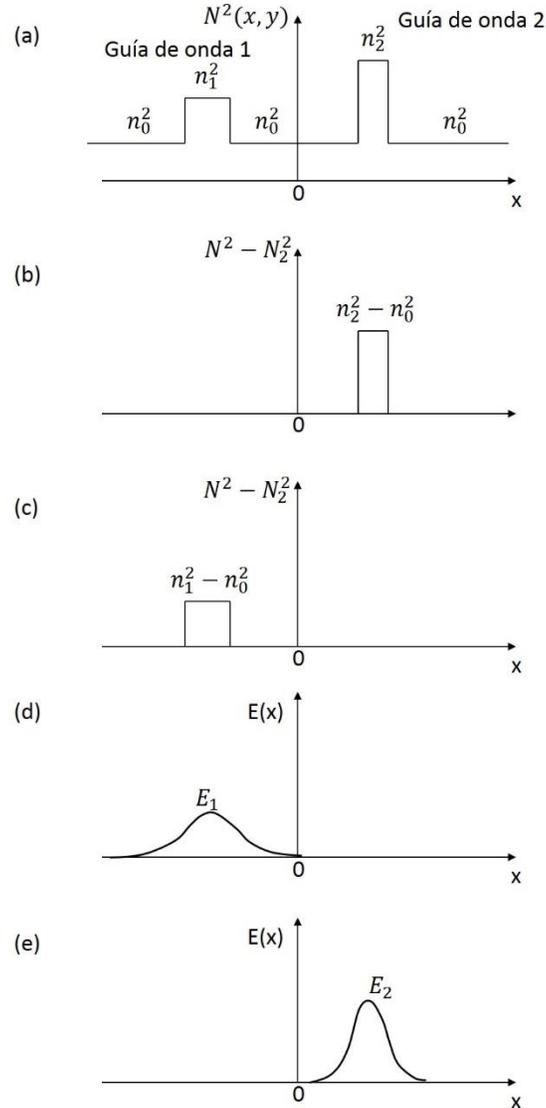


Fig. 2.3. Distribuciones de IR $N^2(x, y)$ de las guías de onda acopladas, la diferencia de las distribuciones de IR ($N^2 - N_p^2$) y el campo eléctrico E_p que aparece en las ecuaciones (2.14) y (2.16).

Luego la magnitud de la integral de κ_{12} en el numerador es cercano a $(n_1^2 - n_0^2)\eta$. La integral de χ_1 en la ecuación (2.16) es válida para la guía de onda 2, donde $(N^2 - N_1^2)$ es diferente de cero. Entonces, al calcular la integral de χ_1 en el numerador, obtenemos un valor cercano a $(n_1^2 - n_0^2)\eta^2$, dado que la fuerza del campo eléctrico E_1 en la guía de onda 2 es cercano al factor η . Basándonos en estas

comparaciones, podemos conocer que χ_p es η veces menor que κ_{pq} . Entonces, χ_p puede ser despreciado cuando dos guías están lo suficientemente separadas y se cumple $\eta \ll 1$, puesto que χ_p es mucho menor que κ_{pq} . Y por el contrario, χ_p no puede ser despreciada cuando las dos guías son muy cercanas la una a la otra.

En la mayoría de los análisis convencionales de acopladores direccionales, c_{pq} y χ_p fueron despreciados y se asumió que fueran $c_{pq} = \chi_p = 0$. Sin embargo, ambos c_{pq} y χ_p deben ser tomados en cuenta estrictamente para analizar el acoplamiento de modos.

Para obtener la potencia óptica llevada por el eigenmodo en la guía de onda p ($p = 1, 2$) partimos de la ecuación de la potencia de flujo promediada en el tiempo.

$$P = \iint_S \frac{1}{2} (\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) \cdot \mathbf{u}_z ds. \quad (2.17)$$

Entonces podemos reescribir la potencia óptica llevada por el eigenmodo como

$$P_p = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (\mathbf{E}_p \times \mathbf{H}_p^*) \cdot \mathbf{u}_z dx dy \quad (p = 1, 2). \quad (2.18)$$

Utilizando la ecuación (2.18) podemos obtener el resultado de las integrales en los denominadores de las ecuaciones (2.14-2.16) con valores igual a $4P_p$. Por lo tanto se asume que los eigenmodos en ambas guías de onda están normalizados para satisfacer la siguiente condición.

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (\mathbf{E}_p^* \times \mathbf{H}_p + \mathbf{E}_p \times \mathbf{H}_p^*) \cdot \mathbf{u}_z dx dy = 4P_p = 1 \quad (p = 1, 2). \quad (2.19)$$

Entonces obtenemos de la ecuación (2.15),

$$c_{21} = c_{12}^*, \quad (2.20)$$

y por consiguiente de forma directa se obtiene de la ecuación (2.16)

$$\chi_p = \chi_p^* \quad (p = 1, 2), \quad (2.21)$$

otro factor importante para considerar es la expresión para la diferencia de las constantes de propagación entre las guías de onda 1 y 2 la cual puede ser expresada como

$$\delta = \frac{\beta_2 - \beta_1}{2} . \quad (2.22)$$

Después, la potencia óptica en la estructura compuesta por el acoplamiento de las guías es expresada por

$$P = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (\tilde{\mathbf{E}} \times \tilde{\mathbf{H}}^*) \cdot \mathbf{u}_z dx dy . \quad (2.23)$$

Substituyendo las ecuaciones (2.2) y (2.11) en la ecuación (2.23) tenemos

$$P = \frac{1}{2} [|A|^2 + |B|^2 + A^* B c_{12} \exp(-j2\delta z) + AB^* c_{12}^* \exp(j2\delta z)] . \quad (2.24)$$

Para la derivación de esta última ecuación hemos utilizado las ecuaciones (2.15), (2.19) y (2.20).

En guías de onda sin pérdidas, la potencia óptica se mantiene constante, es decir

$$\frac{dP}{dz} = 0 . \quad (2.25)$$

Substituyendo las ecuaciones (2.12), (2.13) y (2.24) en la ecuación (2.25) obtenemos

$$jA^*B(\kappa_{21}^* - \kappa_{12} - 2\delta c_{12})\exp(-j2\delta z) - jAB^*(\kappa_{21} - \kappa_{12}^* - 2\delta c_{12}^*)\exp(j2\delta z) = 0 . \quad (2.26)$$

Para que la ecuación (2.26) sea satisfecha independientemente de z , debemos de tener

$$\kappa_{21} = \kappa_{12}^* + 2\delta c_{12}^* . \quad (2.27)$$

En la mayoría del análisis convencional, la reciprocidad de los coeficientes de acoplamiento fue expresada por $\kappa_{21} = \kappa_{12}^*$, puesto que c_{12} se asumió que fuera cero. Sin embargo, $\kappa_{21} = \kappa_{12}^*$ permanece únicamente cuando las constantes de propagación de las dos guías de onda son iguales $\beta_1 = \beta_2$ ó cuando no existe interacción entre los campos electromagnéticos de ambas guías de onda ($c_{12} \cong 0$).

A continuación se derivan las ecuaciones del acoplamiento de modos usando las ecuaciones (2.12) y (2.13). De la igualdad de las ecuaciones (2.12) – (2.13) $\times c_{12} \exp(-j2\delta z) = 0$ y (2.13) – (2.12) $\times c_{21} \exp(j2\delta z) = 0$, obtenemos

$$\frac{dA}{dz} = -j\kappa_a B \exp(-j2\delta z) + j\alpha_a A . \quad (2.28)$$

$$\frac{dB}{dz} = -j\kappa_b A \exp(2\delta z) + j\alpha_b B. \quad (2.29)$$

De las dos ecuaciones anteriores conocidas como ecuaciones de acoplamiento de modos, se definen los siguientes parámetros

$$\kappa_a = \frac{\kappa_{12} - c_{12}\chi_2}{1 - |c_{12}|^2}, \quad (2.30 a)$$

$$\kappa_b = \frac{\kappa_{21} - c_{12}^*\chi_1}{1 - |c_{12}|^2}, \quad (2.30 b)$$

$$\alpha_a = \frac{\kappa_{21}c_{12} - \chi_1}{1 - |c_{12}|^2}, \quad (2.31 a)$$

$$\alpha_b = \frac{\kappa_{12}c_{12}^* - \chi_2}{1 - |c_{12}|^2}. \quad (2.31 b)$$

A continuación, se describe el método de solución para las ecuaciones de modos acoplados (2.28) y (2.29) para el acoplador codireccional ($\beta_1 > 0, \beta_2 > 0$).

Se asume $c_{pq} = \chi_p = 0$ ($p, q = 1, 2$) y se reescriben las ecuaciones (2.28) y (2.29) en una forma más simple como

$$\frac{dA}{dz} = -j\kappa_a B \exp[-j(\beta_2 - \beta_1)z], \quad (2.32)$$

$$\frac{dB}{dz} = -j\kappa_b A \exp[+j(\beta_2 - \beta_1)z], \quad (2.33)$$

donde κ_{pq} esta dada por la ecuación (2.14). La relación de reciprocidad de los coeficientes de acoplamiento es

$$\kappa_{21} = \kappa_{12}. \quad (2.34)$$

En la mayoría de los acopladores direccionales, κ_{pq} es real y expresamos $\kappa = \kappa_{21} = \kappa_{12}$.

2.3. El acoplador codireccional

Las soluciones de las ecuaciones de modos acoplados en acopladores que cumplen la condición ($\beta_1 > 0, \beta_2 > 0$) son asumidas en las formas

$$A(z) = [a_1 e^{jqz} + a_2 e^{-jqz}] \exp(-j\delta z), \quad (2.35 a)$$

$$B(z) = [b_1 e^{jqz} + b_2 e^{-jqz}] \exp(j\delta z), \quad (2.35 b)$$

donde q es un parámetro desconocido para ser determinado. Las constantes $a_1, a_2, b_1,$ y b_2 deben satisfacer las condiciones iniciales

$$a_1 + a_2 = A(0), \quad (2.36 a)$$

$$b_1 + b_2 = B(0). \quad (2.36 b)$$

Substituyendo las ecuaciones (2.35) en las ecuaciones de modos acoplados (2.32) y (2.33) y utilizando las condiciones iniciales de las ecuaciones (2.36), podemos obtener el siguiente conjunto de ecuaciones

$$A(z) = \left\{ \left[\cos(qz) + j \frac{\delta}{q} \sin(qz) \right] A(0) - j \frac{\kappa}{q} \sin(qz) B(0) \right\} \exp(-j\delta z), \quad (2.37)$$

$$B(z) = \left\{ -j \frac{\kappa}{q} \sin(qz) A(0) + \left[\cos(qz) - j \frac{\delta}{q} \sin(qz) \right] B(0) \right\} \exp(j\delta z), \quad (2.38)$$

donde q esta dada por

$$q = \sqrt{\kappa^2 + \delta^2}. \quad (2.39)$$

Después, para calcular las potencias de salida del acoplador, revisamos el caso más común donde la luz es acoplada en la guía 1 en $z = 0$, aplicamos las condiciones iniciales de $A(0) = A_0$ y $b(0) = 0$, y tenemos que la potencia óptica guiada a lo largo de la dirección z esta dada por

$$P_a(z) = \frac{|A(z)|^2}{|A_0|^2} = 1 - F \sin^2(qz), \quad (2.40)$$

$$P_b(z) = \frac{|B(z)|^2}{|A_0|^2} = F \sin^2(qz), \quad (2.41)$$

donde F denota la máxima potencia de acoplamiento, definida por

$$F = \left(\frac{\kappa}{q}\right)^2 = \frac{1}{1+(\delta/\kappa)^2}. \quad (2.42)$$

La Fig. 2.4 muestra la dependencia de P_a y P_b sobre la longitud de acoplamiento qz para cuando la máxima potencia de acoplamiento es $F = 1.0$.

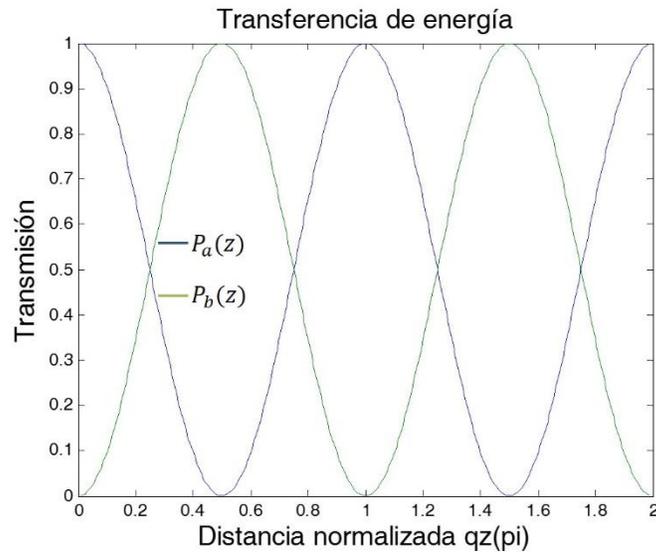


Fig. 2.4. Variación de la potencia óptica en el acoplador direccional con $F = 1.0$.

Para que toda la potencia que es acoplada en el puerto de entrada de la guía de onda 1 pase al puerto de salida de la guía de onda 2 se debe cumplir la siguiente condición

$$z = \frac{\pi}{2q} (2m + 1) \quad (m = 0, 1, 2, \dots). \quad (2.43)$$

La longitud z en $m = 0$ es llamada longitud de acoplamiento y está dada por

$$L_c = \frac{\pi}{2q} = \frac{\pi}{2\sqrt{\kappa^2 + \delta^2}}. \quad (2.44)$$

Un acoplamiento de 100% ocurre cuando las constantes de propagación de las dos guías son iguales $\beta_1 = \beta_2$ sobre una longitud de acoplamiento dada por

$$L_c = \frac{\pi}{2\kappa}. \quad (2.45)$$

2.4. Derivación de los coeficientes de acoplamiento basados en interferencia modal

A continuación derivamos el coeficiente de acoplamiento κ el cual es muy importante para el cálculo de la longitud de acoplamiento en el acoplador direccional.

El efecto de acoplamiento modal en los acopladores direccionales puede ser visto como una interferencia entre los modos par (simétrico) e impar (antisimétrico) cuando la estructura compuesta por dos guías de onda se asume como una guía de onda plana de cinco niveles [6], como se muestra en la Fig. (2.5). Asumiendo una estructura de este tipo se pueden despreciar los modos de orden superior. El campo eléctrico en el acoplador direccional puede ser estimado mediante la suma del modo par (modo de primer orden en la guía de onda de cinco niveles) y el modo impar (modo de segundo orden en la guía de onda de cinco niveles):

$$E(x, z) = E_e(x) \exp(-j\beta_e z) + E_o(x) \exp(-j\beta_o z), \quad (2.46)$$

donde $E_e(x)$ y β_e denotan el campo eléctrico y la constante de propagación del modo par y $E_o(x)$ y β_o denotan el campo eléctrico y la constante de propagación del modo impar. El campo eléctrico incidente, el cual es acoplado a la guía de onda 1 en $z = 0$, es expresado como

$$|E(x, 0)| = |E_e(x) + E_o(x)| = E_1(x). \quad (2.47)$$

Donde $E_1(x)$ denota el eigenmodo de la guía de onda 1. Cuando los núcleos de las guías de onda 1 y 2 no están muy cercanos es decir para acopladores débilmente fusionados, esta expresión sigue siendo válida con buena aproximación. De la ecuación (2.46) podemos obtener la amplitud del campo eléctrico en z , como

$$|E(x, z)| = |E_e(x) + E_o(x) \exp[j(\beta_e - \beta_o)z]|. \quad (2.48)$$

La distribución del campo eléctrico en $z = \pi/(\beta_e - \beta_o)$ esta dada por

$$|E(x, z)| = |E_e(x) - E_o(x)| = E_2(x), \quad (2.49)$$

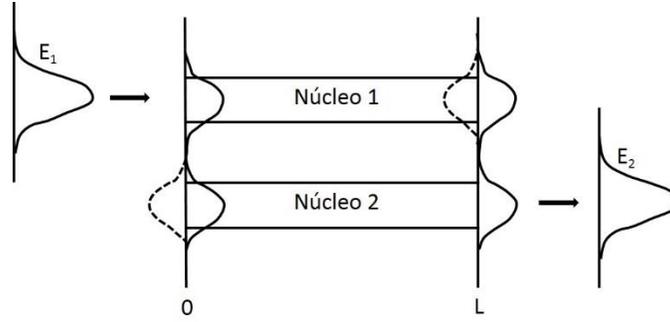


Fig. 2.5 Modo par (línea sólida) y modo impar (línea punteada) en una guía de onda plana de cinco niveles.

donde $E_2(x)$ denota el eigenmodo de la guía de onda 2. Con la ecuación (2.49) queremos decir que el campo incidente acoplado a la guía de onda 1 cambiará a la guía de onda 2 en una distancia

$$L_c = \frac{\pi}{\beta_e - \beta_0}. \quad (2.50)$$

Si tomamos en cuenta las ecuaciones (2.45) y (2.50) podemos obtener el coeficiente de acoplamiento de la siguiente manera:

$$\kappa = \frac{\pi}{2L_c} = \frac{\beta_e - \beta_0}{2}. \quad (2.51)$$

Como estamos trabajando con una estructura que simula una guía de onda de cinco niveles, podemos encontrar el coeficiente de acoplamiento modal κ para el modo TE (transversal eléctrico). Entonces las ecuaciones eigenvalor de la guía de onda plana de cinco niveles en el sistema compuesto que se muestra en la Fig. 2.6 está dado por

$$2u = \tan^{-1}\left(\frac{w}{u}\right) + \tan^{-1}\left\{\frac{w}{u} \tanh\left[\left(\frac{D}{2a} - 1\right)w\right]\right\} \quad (\text{modo par}) \quad (2.52)$$

$$2u = \tan^{-1}\left(\frac{w}{u}\right) + \tan^{-1}\left\{\frac{w}{u} \coth\left[\left(\frac{D}{2a} - 1\right)w\right]\right\} \quad (\text{modo impar}), \quad (2.53)$$

Siendo D la distancia de centro a centro de las guías en la estructura y $2a$ es el ancho de cada guía individual, además u y w están dadas por:

$$u = a\sqrt{k^2 n_1^2 - \beta^2}, \quad (2.54 \text{ a})$$

$$w = a\sqrt{\beta^2 - k^2 n_0^2}. \quad (2.54 \text{ b})$$

donde k es el número de onda para determinado nivel en la estructura compuesta.

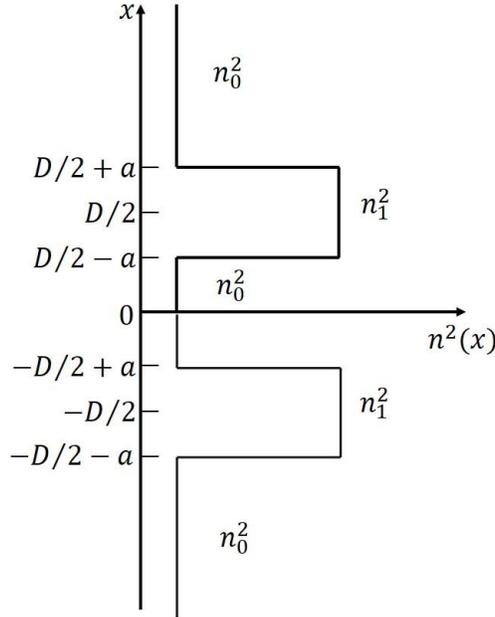


Fig. 2.6.- Distribución de IR de la guía de onda plana de cinco niveles.

Cuando la separación del núcleo D se aproxima a infinito ($D \rightarrow \infty$), las ecuaciones (2.52) y (2.53) se reducen a la ecuación eigenmodo de una guía de onda plana simple.

$$u_0 = \tan^{-1} \left(\frac{w_0}{u_0} \right). \quad (2.55)$$

Denotamos la constante de propagación derivada de la ecuación (2.55) como $\beta^{(0)}$. Cuando el acoplamiento de modos entre las guías de onda es débil, las ecuaciones de los eigenmodos (2.52) y (2.53) son consideradas como una perturbación de la ecuación (2.55). Entonces la constante de propagación para el modo par se expresa como

$$\beta_e = \beta^{(0)} + \delta\beta_e. \quad (2.56)$$

Substituyendo la ecuación (2.56) en la ecuación (2.54 a), obtenemos

$$2u = 2a\sqrt{k^2 n_1^2 - (\beta^{(0)} + \delta\beta_e)^2} \cong 2u_0 - \frac{2\beta^{(0)}a^2}{u_0} \delta\beta_e. \quad (2.57)$$

En una manera similar, cada término de la mano derecha de la ecuación (2.52) puede ser aproximado a la siguiente expresión

$$\tan^{-1}\left(\frac{w}{u}\right) \cong u_0 + \frac{\beta^{(0)}a^2}{u_0 w_0} \delta\beta_e, \quad (2.58 a)$$

$$\tan^{-1}\left\{\frac{w}{u} \tanh\left[\left(\frac{D}{2a} - 1\right)w\right]\right\} \cong -u_0 + \frac{\beta^{(0)}a^2}{u_0 w_0} \delta\beta_e - \frac{2u_0 w_0}{v_0^2} \exp\left[-2w_0\left(\frac{D}{2a} - 1\right)\right], \quad (2.58 b)$$

donde el término v corresponde a la frecuencia normalizada para este caso y también hemos utilizado la identidad $\tanh(z) \cong 1 - 2e^{-2z}$.

Después, substituyendo las ecuaciones (2.57) y (2.58) en la ecuación (2.52), obtenemos

$$\frac{(1+w_0)}{v_0 w_0} \beta^{(0)} a^2 \delta\beta_e = u_0 + \frac{u_0 w_0}{v_0^2} \exp\left[-\frac{w_0}{a}(D - 2a)\right]. \quad (2.59)$$

De manera similar, la expresión para $\delta\beta_0 = \beta_0 - \beta^{(0)}$ es obtenida como

$$\frac{(1+w_0)}{v_0 w_0} \beta^{(0)} a^2 \delta\beta_0 = u_0 - \frac{u_0 w_0}{v_0^2} \exp\left[-\frac{w_0}{a}(D - 2a)\right]. \quad (2.60)$$

Entonces, substituyendo las ecuaciones (2.59) y (2.60) en la ecuación (2.51), podemos encontrar el coeficiente de acoplamiento modal κ como

$$\kappa = \frac{(\delta\beta_e - \delta\beta_0)}{2} = \frac{u_0^2 w_0^2}{\beta^{(0)} a^2 (1+w_0) v_0^2} \exp\left[-\frac{w_0}{a}(D - 2a)\right]. \quad (2.61)$$

2.5. Coeficientes de acoplamiento para fibras ópticas

La ecuación 2.14 para el coeficiente de acoplamiento modal puede ser reescrita como,

$$\kappa = \frac{\omega \varepsilon_0 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (N^2 - N_1^2) \mathbf{E}_1^* \cdot \mathbf{E}_2 dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{u}_z \cdot (\mathbf{E}_1^* \times \mathbf{H}_1 + \mathbf{E}_1 \times \mathbf{H}_1^*) dx dy} \quad (2.62)$$

Es conocido de manera clara que el modo fundamental que se propaga en una fibra óptica es el modo HE₁₁ y si se conocen las distribuciones del campo electromagnético para este modo y haciendo un análisis estrictamente bajo una aproximación de guiado débil $n_1/n_0 \cong 1$, podemos usar la siguiente relación

$$s = s_1 = s_2 = -1, \quad (2.63)$$

donde

$$s = \frac{n\left(\frac{1}{u^2} + \frac{1}{w^2}\right)}{\left[\frac{J'_n(u)}{uJ_n(u)} + \frac{K'_n(w)}{\omega K_n(w)}\right]}, \quad (2.64)$$

y el denominador de la ecuación 2.64 es una ecuación de dispersión para los modos híbridos basada en las formulas de la función de Bessel. Analizando por la aproximación de guiado débil se asume que

$$\frac{J'_n(u)}{uJ_n(u)} + \frac{K'_n(w)}{\omega K_n(w)} = \pm n \left(\frac{1}{u^2} + \frac{1}{w^2} \right), \quad (2.65)$$

Por lo tanto es válida la ecuación 2.63. Aquí u y w son los números de onda transversales normalizados. La ecuación 2.65 nos simplifica las expresiones de los campos electromagnéticos del modo HE₁₁, además utilizando el término $C = -j(\beta a/u)A$, para la constante, podemos escribir los campos electromagnéticos como:

a. Región del núcleo ($0 \leq r \leq a$):

$$E_x = C J_0 \left(\frac{u}{a} r \right) \cos \psi, \quad (2.66 \text{ a})$$

$$E_y = -C J_0 \left(\frac{u}{a} r \right) \sen \psi, \quad (2.66 \text{ b})$$

$$E_z = j \frac{u}{\beta a} C J_1 \left(\frac{u}{a} r \right) \cos(\theta + \psi), \quad (2.66 \text{ c})$$

$$H_x = \frac{\omega \epsilon_0 n_1^2}{\beta} C J_0 \left(\frac{u}{a} r \right) \sen \psi, \quad (2.66 \text{ d})$$

$$H_y = \frac{\omega \varepsilon_0 n_1^2}{\beta} C J_0 \left(\frac{u}{a} r \right) \cos \psi, \quad (2.66 \text{ e})$$

$$H_z = j \frac{u}{\omega \varepsilon_0 a} C J_1 \left(\frac{u}{a} r \right) \sin(\theta + \psi), \quad (2.66 \text{ f})$$

b. región del cladding ($r > a$):

$$E_x = C \frac{J_0(u)}{K_0(w)} K_0 \left(\frac{w}{a} r \right) \cos \psi, \quad (2.67 \text{ a})$$

$$E_y = -C \frac{J_0(u)}{K_0(w)} K_0 \left(\frac{w}{a} r \right) \sin \psi, \quad (2.67 \text{ b})$$

$$E_z = j \frac{u}{\beta a} C \frac{J_1(u)}{K_1(w)} K_1 \left(\frac{w}{a} r \right) \cos(\theta + \psi), \quad (2.67 \text{ c})$$

$$H_x = \frac{\omega \varepsilon_0 n_0^2}{\beta} C \frac{J_0(u)}{K_0(w)} K_0 \left(\frac{w}{a} r \right) \sin \psi, \quad (2.67 \text{ d})$$

$$H_y = \frac{\omega \varepsilon_0 n_0^2}{\beta} C \frac{J_0(u)}{K_0(w)} K_0 \left(\frac{w}{a} r \right) \cos \psi, \quad (2.67 \text{ e})$$

$$H_z = j \frac{u}{\omega \varepsilon_0 a} C \frac{J_1(u)}{K_1(w)} K_1 \left(\frac{w}{a} r \right) \sin(\theta + \psi). \quad (2.67 \text{ f})$$

El coeficiente de amplitud del campo C está relacionado a la potencia óptica P

$$|C| = \frac{w}{av J_1(u)} \sqrt{\frac{2P \sqrt{\mu_0 / \varepsilon_0}}{\pi n_1}}, \quad (2.68)$$

donde la velocidad de la luz c fue reemplazada por $1/\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$.

También el denominador de esta ecuación puede ser normalizado de la ecuación (2.19)

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{u}_z \cdot (\mathbf{E}_1^* \times \mathbf{H}_1 + \mathbf{E}_1 \times \mathbf{H}_1^*) dx dy = 4P. \quad (2.69)$$

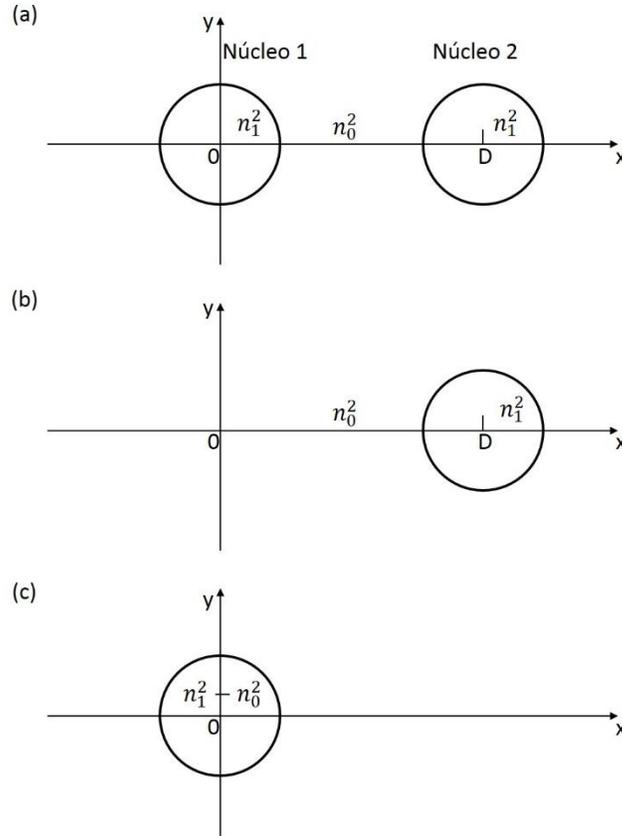


Fig. 2.7.- Geometrías para el cálculo del coeficiente de acoplamiento modal. (a), (b), y (c) representa $N^2(r, \theta)$, $N_2^2(r, \theta)$ y $N^2(r, \theta) - N_2^2(r, \theta)$, respectivamente.

Ahora consideremos la integral del numerador de la ecuación (2.62). Como se puede observar en la Fig. (2.7), $N^2(r, \theta) - N_2^2(r, \theta)$ es cero fuera del núcleo 1. Nótese que el campo eléctrico del núcleo de la ecuación (2.66) es usado para \mathbf{E}_1 y que el campo del cladding de la ecuación (2.67) es usado para \mathbf{E}_2 en la integral dentro del núcleo 1. En el numerador de la ecuación (2.62), la distribución de IR es multiplicada por un factor $\mathbf{E}_1^* \cdot \mathbf{E}_2$ el cual es expresado como:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{E}_1^* \cdot \mathbf{E}_2 &= E_{x1}^* E_{x2} + E_{y1}^* E_{y2} + E_{z1}^* E_{z2} \\
 &= |C|^2 \frac{J_0(u)}{K_0(w)} J_0\left(\frac{u}{a}r\right) K_0\left(\frac{w}{a}R\right) + \left(\frac{u}{\beta a}\right)^2 |C|^2 \frac{J_1(u)}{K_1(w)} J_1\left(\frac{u}{a}r\right) K_1\left(\frac{w}{a}R\right) \\
 &\quad \times \cos(\theta + \psi) \cos(\Theta + \psi), \tag{2.70}
 \end{aligned}$$

donde (R, θ) es un sistema de coordenadas que tiene como origen el centro del núcleo 2 como se muestra en la Fig. (2.8).

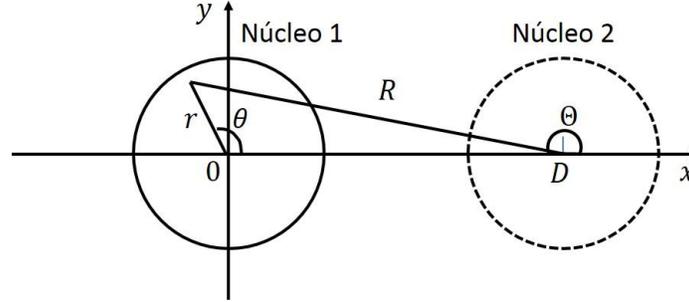


Fig. 2.8.- Sistema coordenado para la integración de $\mathbf{E}_1^* \cdot \mathbf{E}_2$.

La separación del centro de los dos núcleos es denotada por D . Si $D \gg r$ es válido, el radio R puede ser aproximado como

$$R = (D^2 + r^2 - 2Dr \cos \theta)^{1/2} \cong D - r \cos \theta. \quad (2.71)$$

Como el segundo término de la mano derecha de la ecuación (2.70) es lo suficientemente menor que el primer término, la integral en el numerador de la ecuación (2.62) ahora es [7, 8]:

$$S = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (N^2 - N_2^2) \mathbf{E}_1^* \cdot \mathbf{E}_2 dx dy = \int_0^{2\pi} \int_0^a (n_1^2 - n_0^2) |C|^2 \frac{J_0(u)}{K_0(w)} J_0\left(\frac{u}{a} r\right) \times K_0\left(\frac{w}{a} R\right) r dr d\theta. \quad (2.72)$$

Si el argumento de la función modificada de Bessel $K_0(z)$ de esta ecuación es suficientemente grande podemos hacer una aproximación a

$$K_0(z) \cong \sqrt{\frac{\pi}{2z}} \exp(-z). \quad (2.73)$$

Después, sustituyendo la ecuación (2.73) en la ecuación (2.72) obtenemos

$$S = (n_1^2 - n_0^2) |C|^2 \frac{J_0(u)}{K_0(w)} \sqrt{\frac{\pi a}{2wD}} \exp\left(-\frac{w}{a} D\right) \int_0^{2\pi} \int_0^a J_0\left(\frac{u}{a} r\right)$$

$$\times \exp\left(\frac{w}{a}r\cos\theta\right) r dr d\theta. \quad (2.74)$$

Usando las formulas integrales de las funciones de Bessel de la ref. [9], en la ecuación (2.74)

$$I_0(z) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \exp(z\cos\theta) d\theta, \quad (2.75 a)$$

$$\int_0^1 J_0(uz) I_0(wz) z dz = \frac{J_0(u)wI_1(w) + I_0(w)uJ_1(u)}{u^2 + w^2} \quad (2.75 b)$$

obtenemos

$$S = 2\pi a^2 (n_1^2 - n_0^2) |C|^2 \frac{J_0(u)}{K_0(w)} \sqrt{\frac{\pi a}{2wD}} \exp\left(-\frac{w}{a}D\right) \times \frac{uJ_1(u)}{v^2 K_1(w)} \\ \times \left[\frac{J_0(u)}{uJ_1(u)} wK_1(w)I_1(w) + K_1(w)I_0(w) \right]. \quad (2.76)$$

Usando la ecuación de eigenvalor del modo HE₁₁

$$\frac{J_{n-1}(u)}{uJ_n(u)} = \frac{K_{n-1}(w)}{wK_n(w)}, \quad (2.77)$$

con $n = 1$ y la formula de la función de Bessel modificada

$$K_0(w)I_1(w) + K_1(w)I_0(w) = \frac{1}{w}, \quad (2.78)$$

entonces el coeficiente de acoplamiento modal del acoplador direccional está dado por

$$\kappa = \frac{\sqrt{\Delta}}{a} \frac{u^2}{v^3 K_1^2(w)} \sqrt{\frac{\pi a}{wD}} \exp\left(-\frac{w}{a}D\right). \quad (2.79)$$

2.6. Modelado de la transferencia de energía de un acoplador cuando existe una variación del IR externo usando el software Matlab.

(A) El programa que se presenta es la simulación de la transferencia de energía basada en la teoría de perturbación para un acoplador compuesto de dos guías de onda idénticas.

```

% Programa que simula el intercambio de energía en un acoplador

clear all; clc; clf;

% Definimos una longitud z del acoplador
z=125*2; % (pi/2)*100

% Definimos kappa, B1, B2, delta_beta y gamma
kappa=2.5;
B1=0;
B2=0;
delta_beta=B1-B2;
gamma=sqrt(kappa^2+(delta_beta^2/4));

%%Incluimos las ecuaciones (4.39) y (4.40) para las potencias P1 y P2%%
% iniciamos dando pequeños valores a z (distancia)
for i=1:z

    argumento=( gamma*(i/100) );
    P1(i)=1-( (kappa^2/gamma^2)*(sin(argumento))^2 );

    P2(i)=(kappa^2/gamma^2)*(sin(argumento))^2;

    kz(i)=argumento/pi;

end

figure(1)
plot(kz,P1,kz,P2);
Title('Transferencia de energía','FontSize', 15);
xlabel('Distancia normalizada qz(pi)','FontSize', 15);
ylabel('Transmisión','FontSize', 15);

```

La Fig. 2.9 muestra la simulación de la transferencia de energía de un acoplador bicónico de fibra óptica, al iniciar el proceso de estiramiento, los ciclos de transferencia de energía ocurren a una baja velocidad, mientras continua el proceso de estiramiento esta transferencia de energía se vuelve cada vez con mayor frecuencia.

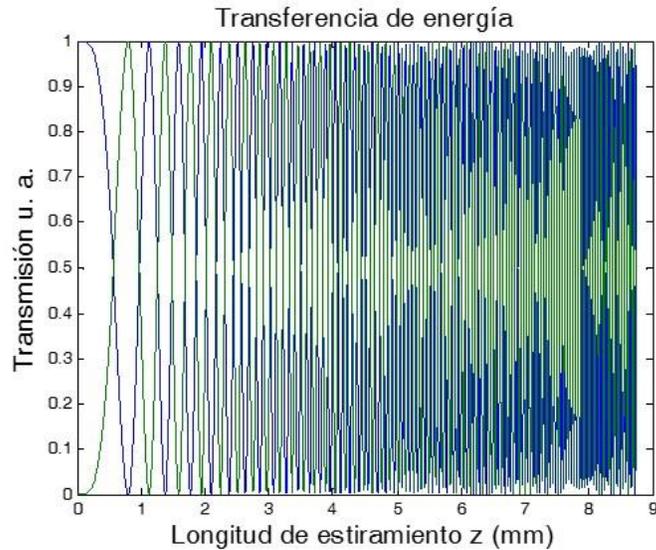


Fig. 2.9. Relación transmisión de potencia y longitud de estiramiento para un acoplador de 8.8 mm de largo. Mientras más grande sea la longitud de estiramiento los ciclos de acoplamiento se vuelven más rápidos.

(B) Programa que simula la transferencia de energía en un acoplador cuando existe una variación del IR externo

```
% Programa que simula el intercambio de energía en un acoplador
% direccional de fibra óptica cuando existen variaciones de IR
% en el medio exterior.

clear all; clc; clf;
tic;

% Definimos la variacion de indice externo
nexts=1:0.02:1.4;

% Definimos la longitud de onda de operación(nanometros)
lamda=1.550;

% Definimos el diametro final del acoplador(micras)
Diametro_acoplador_micras=24

% Defenimos una longitud z del acoplador (metros)
z=0.012 % m

% Diametros de la fibra que utilizamos para fabricar el acoplador
(micras)
Dc1=125; %
Dc =9.3; % (8.2 para smf-28);
```

```

% El acoplador tiene 2 fibras
% entonces diametro de la fibra en el acoplador es:
d_taper=(Diametro_acoplador_micras)/2;      %(micras)

% Radios de la fibra en el acoplador
razon=Dc1/d_taper;
rcl=(Dc1/razon)/2;
rc =(Dc/razon)/2;
rext=Dc1/razon;

%Iniciamos el ciclo de trabajo;
for i=1:length(nexts)
    next=nexts(i)

% Coeficientes de sellmeier
load 'sellmeier2.dat';

    % Factor de corrección
    aaaa=0.99419;      % 0.9996 (smf-28)

    % Coeficientes del núcleo(4.1 GeO2)      % Coeficientes del
    revestimiento (Si)
    Bc1=sellmeier2(4,1)*aaaa;                Bc1=sellmeier2(1,1);
    Bc2=sellmeier2(4,2)*aaaa;                Bc2=sellmeier2(1,2);
    Bc3=sellmeier2(4,3)*aaaa;                Bc3=sellmeier2(1,3);

    ac1=sellmeier2(4,4)*aaaa;                ac1=sellmeier2(1,4);
    ac2=sellmeier2(4,5)*aaaa;                ac2=sellmeier2(1,5);
    ac3=sellmeier2(4,6)*aaaa;                ac3=sellmeier2(1,6);

    % relacion de sellmeier

    W=(2*pi*3e14/lamda);

    Wc1=2*pi*3e14/sqrt(ac1);      Wc11=2*pi*3e14/sqrt(ac11);
    Wc2=2*pi*3e14/sqrt(ac2);      Wc12=2*pi*3e14/sqrt(ac12);
    Wc3=2*pi*3e14/sqrt(ac3);      Wc13=2*pi*3e14/sqrt(ac13);

nc=(sqrt(1 + (Bc1*Wc1^2)/(Wc1^2-W^2) +...
(Bc2*Wc2^2)/(Wc2^2-W^2) + (Bc3*Wc3^2)/(Wc3^2-W^2)));

ncl=(sqrt(1 + (Bc11*Wc11^2)/(Wc11^2-W^2) +...
(Bc12*Wc12^2)/(Wc12^2-W^2) + (Bc13*Wc13^2)/(Wc13^2-W^2)));

% neff del modo del core (asumimos nc=ncl y ncl=next
Ecuacion= @(x) RelacionDispersion_LP01(x,ncl,next,lamda,rcl,rext);
aux =Auxiliar_LP01(ncl,next,lamda,rcl,rext);
nc_eff_01=fzero(Ecuacion,[aux ncl-0.000000000001]);

%Guardamos la información en un arreglo
AA(1,1)=lamda;
AA(1,3)=nc_eff_01;

```

```

% Hay que checar estos 2 parametros
AA(1,8)=nc;
AA(1,9)=ncl;

% Mostramos en pantalla en indice efectivo
neff=AA(1,3);

% Calculamos kappa en (1/m)
Num=1; % Parametro que nos indica el numero de modo del overlap (viene
de un programa previo)
overlap_between_modes=overlap(rc,rcl,rect,AA,Num,next);
kappa=overlap_between_modes(:,1)*1e6; %Kappa en m-1

% Calculamos betas, delta beta y gamma
B1=(2*pi/(lamda*1e-6))*neff;
B2=(2*pi/(lamda*1e-6))*neff;
delta_beta=B2-B1; % si delta_beta = 1000 ya hay cambios
gamma=sqrt(kappa^2+ (delta_beta/2)^2 );
F=(kappa/gamma)^2;

% iniciamos dando pequeños valores a z (distancia)
%step_z=100; % Es el numero de secciones en que dividimos la distancia Z
%for i=1:step_z
    argumento=(gamma*z);
    P1_nexts(i)=1-(F*(sin(argumento))^2);
    P2_nexts(i)=F*(sin(argumento))^2;
    kz(i)=argumento/pi; % arreglo producto kz normalizado a pi
    L_nexts(i)=next; % arreglo de next
%end

end

toc

figure(1)
plot(L_nexts,P1_nexts,L_nexts,P2_nexts),grid;
Title('Transferencia de energía');
xlabel('Indice de refracción rodeando el acoplador');
ylabel('Transmisión');

P11=P1_nexts';
P22=P2_nexts';
LL=L_nexts';
save Puerto_3_nexts.dat P11 /ascii
save Puerto_4_nexts.dat P22 /ascii
save Nexts.dat LL /ascii

pnor=((P11-P22)/(P22+P11)); %normaliza salidas del acoplador
figure(2)
plot(L_nexts,pnor),grid;
Title('Transferencia de energía');
xlabel('Indice de refracción rodeando el acoplador');
ylabel('Transmisión');

```

La Fig. 2.10 muestra una simulación de la transferencia de energía de un acoplador direccional cuando se modifica el IR del medio que lo rodea. Este acoplador se simulo con un estiramiento de 11 mm, un diámetro de cintura de 24 μm , con variación de IR de $n=1$ a $n=1.4$ utilizando una fuente de luz a 1550 nm. En la simulación se puede observar que la razón de acoplamiento cambia drásticamente cuando la transmisión alcanza el IR correspondiente a una gota de agua, el cual corresponde a un IR cercano a 1.333. Después, la curva de transmisión toma una forma sinusoidal conforme se incrementa el IR, este tipo de respuesta es característica de los acopladores de fibra óptica.

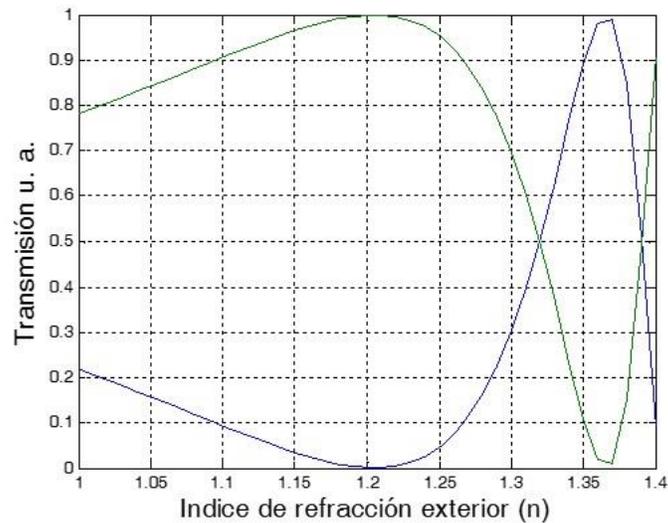


Fig. 2.10. Simulación del intercambio de energía en un acoplador de fibra óptica cuando existen variaciones en el IR externo. Se simula un acoplador de 11 mm de estiramiento y un diámetro de cintura de 24 μm .

2.7. Apéndice 2A derivación de las ecuaciones (2.7) y (2.8)

El termino en la ecuación (2.7) para ser integrado es expresado como

$$\begin{aligned}
I_1 &= \tilde{\mathbf{E}}_1^* \cdot (2.6) - \tilde{\mathbf{H}}_1^* \cdot (2.5) = \frac{dA}{dz} [\tilde{\mathbf{E}}_1^* \cdot (\mathbf{u}_z \times \tilde{\mathbf{H}}_2) - \tilde{\mathbf{H}}_1^* \cdot (\mathbf{u}_z \times \tilde{\mathbf{E}}_2)] \\
&+ \frac{dB}{dz} [\tilde{\mathbf{E}}_1^* \cdot (\mathbf{u}_z \times \tilde{\mathbf{H}}_2) - \tilde{\mathbf{H}}_1^* \cdot (\mathbf{u}_z \times \tilde{\mathbf{E}}_2)] - j\omega\epsilon_0 A (N^2 - N_1^2) \tilde{\mathbf{E}}_1^* \cdot \tilde{\mathbf{E}}_1 \\
&- j\omega\epsilon_0 B (N^2 - N_2^2) \tilde{\mathbf{E}}_1^* \cdot \tilde{\mathbf{E}}_2.
\end{aligned} \tag{2.80}$$

Cuando se usan las siguientes formulas vectoriales

$$\tilde{\mathbf{E}}_1^* \cdot (\mathbf{u}_z \times \tilde{\mathbf{H}}_1) = -\mathbf{u}_z \cdot (\tilde{\mathbf{E}}_1^* \times \tilde{\mathbf{H}}_1), \tag{2.81 a}$$

$$\tilde{\mathbf{H}}_1^* \cdot (\mathbf{u}_z \times \tilde{\mathbf{E}}_1) = \mathbf{u}_z \cdot (\tilde{\mathbf{E}}_1 \times \tilde{\mathbf{H}}_1^*), \tag{2.81 b}$$

entonces la ecuación (2.80) se pueden reescribir como

$$\begin{aligned}
I_1 &= -\frac{dA}{dz} \mathbf{u}_z \cdot [\tilde{\mathbf{E}}_1^* \times \tilde{\mathbf{H}}_1 + \tilde{\mathbf{E}}_1 \times \tilde{\mathbf{H}}_1^*] - \frac{dB}{dz} \mathbf{u}_z \cdot [\tilde{\mathbf{E}}_1^* \times \tilde{\mathbf{H}}_2 + \tilde{\mathbf{E}}_2 \times \tilde{\mathbf{H}}_1^*] \\
&- j\omega\epsilon_0 A (N^2 - N_1^2) \tilde{\mathbf{E}}_1^* \cdot \tilde{\mathbf{E}}_1 - j\omega\epsilon_0 B (N^2 - N_2^2) \tilde{\mathbf{E}}_1^* \cdot \tilde{\mathbf{E}}_2.
\end{aligned} \tag{2.82}$$

Y de manera similar el termino en la ecuación (2.8) se puede expresar como

$$\begin{aligned}
I_2 &= \tilde{\mathbf{E}}_2^* \cdot (2.6) - \tilde{\mathbf{H}}_2^* \cdot (2.5) = -\frac{dA}{dz} \mathbf{u}_z \cdot [\tilde{\mathbf{E}}_2^* \times \tilde{\mathbf{H}}_1 + \tilde{\mathbf{E}}_1 \times \tilde{\mathbf{H}}_2^*] - \frac{dB}{dz} \mathbf{u}_z \cdot [\tilde{\mathbf{E}}_2^* \times \tilde{\mathbf{H}}_2 + \tilde{\mathbf{E}}_2 \times \tilde{\mathbf{H}}_2^*] \\
&- j\omega\epsilon_0 A (N^2 - N_1^2) \tilde{\mathbf{E}}_2^* \cdot \tilde{\mathbf{E}}_1 - j\omega\epsilon_0 B (N^2 - N_2^2) \tilde{\mathbf{E}}_2^* \cdot \tilde{\mathbf{E}}_2.
\end{aligned} \tag{2.83}$$

2.8. Apéndice 2B soluciones exactas para las ecuaciones de modos acoplados (2.28) y (2.29).

Asumimos las soluciones de las ecuaciones de modos acoplados (2.28) y (2.29) en las siguientes formas

$$A(z) = [a_1 e^{jQz} + a_2 e^{-jQz}] \exp \left[-j\delta z + j \frac{\alpha_a + \alpha_b}{2} z \right], \tag{2.84}$$

$$B(z) = [b_1 e^{jQz} + B_2 e^{-jQz}] \exp \left[j\delta z + j \frac{\alpha_a + \alpha_b}{2} z \right]. \tag{2.85}$$

Sustituyendo estas ecuaciones en las ecuaciones (2.28) y (2.29), las relaciones que se obtienen son las siguientes:

$$\chi_a b_1 = (Q - \hat{\delta}) a_1, \quad (2.86)$$

$$\chi_a b_2 = (Q + \hat{\delta}) a_2, \quad (2.87)$$

$$\chi_b a_1 = -(Q + \hat{\delta}) b_1, \quad (2.88)$$

$$\chi_b a_2 = (Q - \hat{\delta}) b_2, \quad (2.89)$$

donde

$$\hat{\delta} = \delta + \frac{\alpha_a - \alpha_b}{2}. \quad (2.90)$$

De modo que las ecuaciones (2.86)-(2.89) tienen soluciones no triviales con la excepción para $a_1 = a_2 = b_1 = b_2 = 0, Q(> 0)$ que deben estar dadas por

$$Q = \sqrt{\chi_a \chi_b + \hat{\delta}^2}. \quad (2.91)$$

Considerando las condiciones de frontera en $z = 0$ como

$$a_1 + a_2 = A(0), \quad (2.92)$$

$$b_1 + b_2 = B(0), \quad (2.93)$$

donde los coeficientes a_1, a_2, b_1 y b_2 están dados por

$$a_1 = \frac{1}{2} \left\{ \left(1 + \frac{\hat{\delta}}{Q} \right) A(0) - \frac{\chi_b}{Q} B(0) \right\}, \quad (2.94)$$

$$a_2 = \frac{1}{2} \left\{ \left(1 - \frac{\hat{\delta}}{Q} \right) A(0) + \frac{\chi_b}{Q} B(0) \right\}, \quad (2.95)$$

$$b_1 = \frac{1}{2} \left\{ -\frac{\chi_a}{Q} A(0) + \left(1 - \frac{\hat{\delta}}{Q} \right) B(0) \right\}, \quad (2.96)$$

$$b_2 = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\chi_a}{Q} A(0) + \left(1 + \frac{\hat{\delta}}{Q} \right) B(0) \right\}. \quad (2.97)$$

Entonces sustituyendo las ecuaciones (2.94)-(2.97) en las ecuaciones (2.84) y (2.85), obtenemos las soluciones estrictas para las ecuaciones de modos acoplados:

$$A(z) = \left\{ \left[\cos(Qz) + j \frac{\hat{\delta}}{Q} \text{sen}(Qz) \right] A(0) - j \frac{\chi_a}{Q} \text{sen}(Qz) B(0) \right\} \exp[-j(\hat{\delta} - \alpha_a)z], \quad (2.98)$$

$$B(z) = \left\{ -j \frac{\chi_b}{Q} \text{sen}(Qz) A(0) + \left[\cos(Qz) - j \frac{\hat{\delta}}{Q} \text{sen}(Qz) \right] B(0) \right\} \exp[j(\hat{\delta} + \alpha_b)z], \quad (2.99)$$

2.9. Referencias

- [1] B. S. Kawasaki, K. O. Hill, and R. G. Lamont, "Biconical-taper single-mode fiber coupler," *Opt. Lett.*, vol. 6, no. 7, pp. 327-328, 1981.
- [2] K. Okamoto, "Fundamentals of Optical Waveguides", Academic Press, Appendix 4A, 4B, pp.168-170, 2000.
- [3] Marcuse, D, "Light Transmission Optics," New York: Van Nostrand Reinhold, 1972.
- [4] Hardy, A., and W. Streifer, "Coupled-mode theory of parallel waveguides", *IEEE J. Lightwave Tech.* LT-3, pp. 1135–1147, 1985
- [5] Marcatili, E. A. J, "Improved coupled-mode equations for dielectric guides", *IEEE J. Quantum Electron.* QE-22, pp. 988–993, 1986.
- [6] Marcuse, D, "Theory of Dielectric Optical Waveguides", New York: Academic Press, 1974.
- [7] Marcuse, D, "The coupling of degenerate modes in two parallel dielectric waveguides", *Bell. Syst. Tech. J.* 50, pp. 1791–1816, 1971.
- [8] Snyder, A. W., and J. D. Love, *Optical Waveguide Theory*. London: Chapman and Hall, 1983.
- [9] Watson, G. N. "Theory of Bessel Functions", New York: Cambridge University Press, 1962.

Capítulo 3

Medición de cambios de índices de refracción usando acopladores bicónicos de fibra óptica

En este capítulo se presenta un estudio experimental detallado de un sensor de fibra óptica basado en un acoplador bicónico por fusión. Se demuestra que el dispositivo presenta una alta sensibilidad para la medición de cambios de índice de refracción (IR) en concentraciones de azúcar en agua. El sensor es operado para lograr una respuesta en transmisión lineal, permitiendo una relación lineal entre la señal de salida y la concentración de azúcar. La sensibilidad lograda con este dispositivo fue de 0.15 unidades de transmisión normalizada por unidad de concentración de azúcar (1/%) y un mínimo límite de detección de 0.012 porcentaje de peso de concentración de azúcar (wt%). De este resultado el cambio de IR mínimo detectable es de 2.27×10^{-5} unidades de índice de refracción (RIU, refractive index unit).

3.1. Introducción

Los acopladores de fibra óptica han atraído atención considerable en años recientes por su eficiencia para detectar pequeños cambios en los IR de soluciones líquidas. En estos dispositivos el espectro de transmisión se ve seriamente afectado por el IR del medio que lo rodea debido al campo evanescente que es generado a lo largo de la zona de acoplamiento [1]. Este efecto ha sido probado de manera efectiva para aplicaciones de sensado [2]. Existen investigaciones recientes sobre sensores de IR basados en acopladores de fibra óptica, algunos de estas investigaciones incluyen sensores con acopladores bicónicos de fibra óptica [3-7], microfibras ópticas [8-12], fibras de cristal fotónico [13, 14] y fibras ópticas especialmente diseñadas con doble núcleo [15, 16], todos estos dispositivos ofrecen las ventajas de alta sensibilidad, integración directa con sistemas de medición de fibra óptica, mediciones *in situ*, tamaño compacto e inmunidad a la interferencia electromagnética externa. La mayoría de estas investigaciones reportan mediciones en longitud de onda y las sensibilidades logradas están en un rango de 1,125 a

30,100 nm por RIU y con un mínimo límite de detección entre 4×10^{-4} y 4×10^{-7} RIU, respectivamente.

Desde el punto de vista de implementación, la necesidad de equipos costosos, como los analizadores de espectros, para la medición de los cambios en la longitud de onda afecta severamente el uso de los sensores de IR basados en acopladores de fibra óptica. Por lo tanto, vale la pena considerar un esquema alternativo que base su operación en la medición de potencia transmitida; explotando la dependencia del campo evanescente en el acoplador con el medio que lo rodea. Un dispositivo de cuatro puertos como el acoplador, nos permite tener una normalización óptima directa, esto es, podemos medir la diferencia en potencia en los puertos de salida y dividirla entre la suma de las potencias, lo cual automáticamente compensa las fluctuaciones de potencia. En trabajos anteriores, se han presentado el uso de acopladores bicónicos tradicionales para demostrar que existe una dependencia entre la potencia de acoplamiento y cambios de IR externo y se ha propuesto que es posible el uso de estas estructuras para desarrollar un refractómetro basado en fibra [1], [17]. H. Tazawa [2], implemento un experimento estimando la potencia para demostrar un bio-sensor con un límite de detección estimado de 4×10^{-6} RIU. Recientemente, se ha demostrado que interferómetros modales basados en guías de onda integradas proveen una de las mejores resoluciones reportadas (2.5×10^{-7} RIU) [18]. Un acoplador bicónico es, en efecto, un interferómetro modal en el cual la diferencia de fase entre los supermodos simétricos y asimétricos determina la distribución de potencia en los puertos de salida del acoplador. Pequeños cambios en los IR externos no modifican substancialmente el coeficiente de acoplamiento, pero generan una diferencia de fase significativa entre los supermodos. En términos de sensores de IR basados en acopladores de fibra, este último punto merece una atención particular para la detección de pequeños cambios en los IR de soluciones acuosas. Aunque algunos esquemas han reportado este efecto, [1], [2], [17], estos trabajos no han reportado las condiciones para un óptimo rendimiento del dispositivo. Parte de esta tesis tiene como propósito el análisis experimental de un acoplador bicónico de fibra óptica

operado en los ciclos iniciales de acoplamiento, con una transmisión de potencia que depende del medio que lo rodea.

El objetivo en este trabajo no solo es entender la dinámica de este tipo de dispositivos, sino también buscar una optimización en su rendimiento. Basado en esta motivación, analizamos la transmisión de potencia en un acoplador bicónico de fibra óptica para encontrar una respuesta de transmisión óptima y lograr mediciones con alta sensibilidad. Los méritos de este sensor serán, confiabilidad, alta sensibilidad y simplicidad en la fabricación.

En este capítulo de la tesis se demuestra un sensor de fibra óptica compacto basado en un acoplador bicónico de fibra óptica. Los acopladores son fabricados mediante la técnica estándar de fusión y estiramiento, con longitudes totales relativamente cortas cercanas a 13 mm y pérdidas de inserción menores a 0.6 dB. La sensibilidad del esquema propuesto es puesto a prueba midiendo variaciones de IR de concentraciones de azúcar en agua. Se reporta como la sensibilidad es mejorada operando al acoplador en ciclos posteriores al primer ciclo inicial de acoplamiento, logrando una sensibilidad mejorada de 0.15 (1/%) y un límite de detección mínimo de 0.01 (wt%). Para este resultado el cambio mínimo detectable de IR es estimado en 2.27×10^{-5} RIU. Este resultado experimental está dentro de los mejores resultados reportados en el marco de sensores de IR basados en acopladores de fibra óptica y provee información útil para una futura optimización de la respuesta del sensor.

3.2. Fabricación del acoplador de fibra óptica

El laboratorio fibras ópticas cuenta con un equipo estándar para la fabricación de fibras ópticas estrechadas usando la técnica de fusión y estiramiento [19]. A este equipo se le conoce como, Máquina para la fabricación de fibras ópticas estrechadas por fusión y estiramiento (MFFOE), el esquema se muestra en la Fig. 3.1. La máquina consta de tres motores a pasos, dos motores son los encargados de estirar la fibra a una velocidad constante y giran en sentido contrario el uno respecto al otro, el tercer motor mueve el quemador de derecha a izquierda sobre

la región a estirar, para que la fibra se vuelva maleable. Estos motores son controlados mediante un software programado en C++, donde están incluidos los parámetros de para la fabricación de las fibras estrechadas [20]. En el software se introducen los parámetros de fabricación como: diámetro inicial, diámetro final, longitud de cintura, velocidad de estiramiento, velocidad de barrido del quemador y un parámetro denominado por la letra griega “alfa” que controla el perfil de transición que tendrá la fibra estrechada. La flama es producida por una mezcla de gases de oxígeno y butano y alcanza una temperatura mayor a 1000 °C, con esta temperatura la fibra se vuelve maleable y puede ser estrechada y adelgazada sin romperse. El flujo de los gases es controlado electrónicamente mediante unas válvulas de precisión de la marca Brooks Instrument, las cuales permiten el flujo de gas dependiendo de un voltaje que puede variar entre 0-5 V. Con este sistema de estiramiento de fibra óptica, en un ambiente ideal, se puede fabricar fibras estrechadas con un diámetro inferior a 1 μm y con pérdidas en transmisión menores a 1 dB.

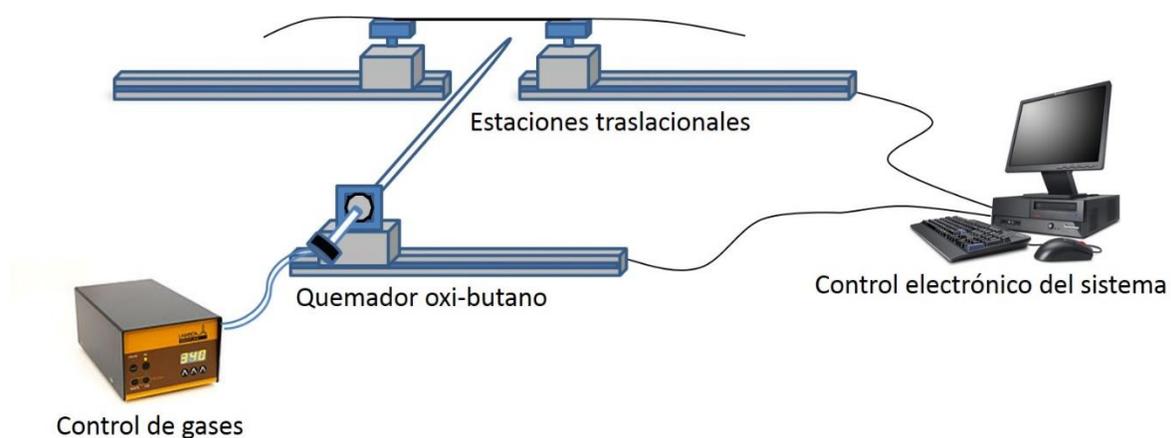


Fig. 3.1. Máquina para la fabricación de fibras ópticas estrechadas por fusión y estiramiento, (MFFOE).

Para la fabricación de los acopladores bicónicos de fibra óptica se implementó un arreglo experimental sencillo como el que se muestra en la Fig. 3.2. Estos acopladores son fabricados a partir de dos fibras ópticas monomodo (SMF, single

mode fiber) comerciales SMF-28 de la marca Corning, las cuales tienen un diámetro exterior de 125 μm . Las fibras son entrelazadas y fijadas sobre las estaciones traslacionales de la MFFOE, cuando se inicia la operación de la máquina, la flama se mueve de derecha a izquierda justo debajo de donde fueron entrelazadas las fibras, mientras los motores a pasos giran con la misma fuerza y velocidad pero en dirección opuesta estirando y fusionando las fibras hasta formar una estructura compuesta por la fusión de dos fibras ópticas. Si la fusión es exitosa, ambos núcleos están suficientemente cerca y se puede lograr una transferencia de energía entre las fibras.

Para monitorear la fabricación del acoplador, se utilizó como fuente de luz un diodo laser de retroalimentación distribuida (DFB, distributed feedback laser) de la compañía Mitsubishi, modelo 925B11F-01, el cual es colocado sobre una montura TLCDM9 de la compañía Thorlabs, este laser emite a una longitud de onda de 1550 nm, tiene una corriente de operación entre 10 mA y 30 mA y una potencia máxima de salida 5 mW. El láser es conectado al puerto 1 (P_1) del acoplador y la luz que es transmitida en los puertos 3 y 4 de salida (P_3 y P_4) es detectada por dos fotodiodos rápidos de 1.2 Ghz modelo DET01CFC de Thorlabs. Estos detectores mandan la señal transmitida para ser monitoreada en tiempo real por un osciloscopio digital Tektronix DPO 4104B con 1 Ghz de ancho de banda.

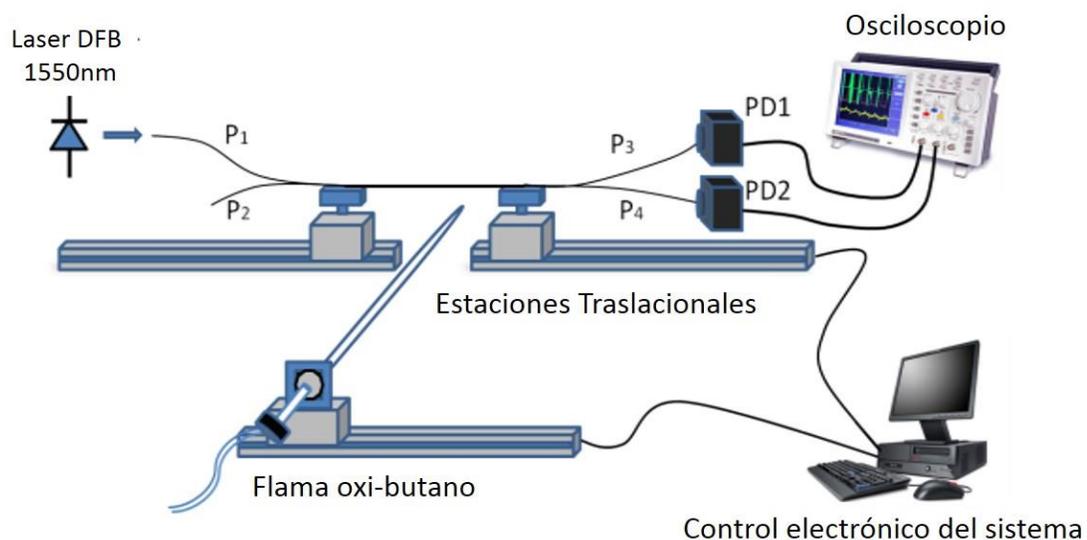


Fig. 3.2. Arreglo experimental para la fabricación de acopladores bicónicos de fibras ópticas por fusión y estiramiento.

Mediante este sistema los acopladores pueden ser fabricados con cualquier razón de acoplamiento, durante el proceso de fabricación detenemos el proceso cuando la transferencia de energía entre los puertos (P_3 y P_4) es la deseada. Siempre que un acoplador es fabricado, presenta una relación particular entre la variación de la potencia en los puertos de salida y la longitud de estiramiento, a esta función se le conoce como firma de estiramiento. En la Fig. 3.3 (a) se muestra la firma de estiramiento para un acoplador con un diámetro final de $1\ \mu\text{m}$, una cintura de $2\ \text{mm}$ y una longitud total de $24\ \text{mm}$. El diámetro final es estimado usando un modelo bien definido para la fabricación de fibras estrechadas [20] y verificado mediante microscopio. La Fig. 3.3 (b) muestra el perfil bicónico de este mismo acoplador.

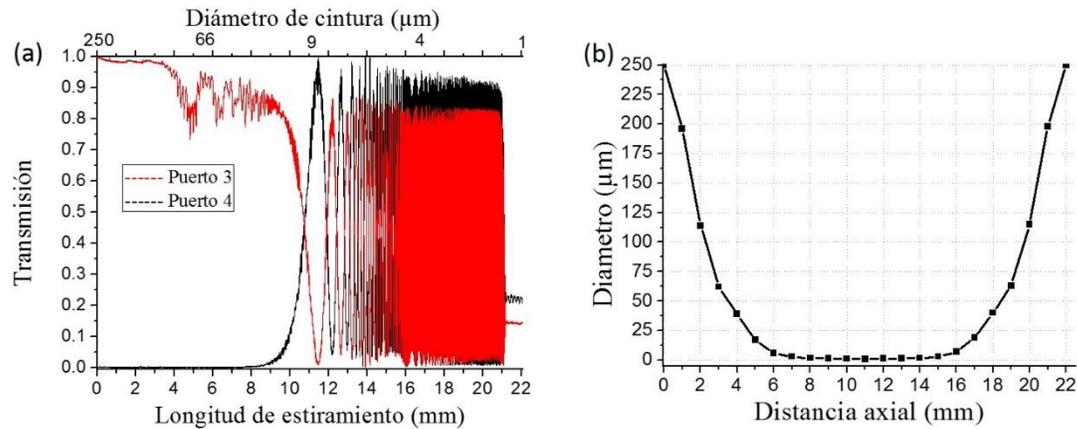


Fig. 3.3.- (a) Variación de la potencia como una función de la longitud de estiramiento (firma de estiramiento). (b) Perfil de diámetro del acoplador bicónico de fibra óptica.

La firma de estiramiento proporciona una información esencial para determinar cuál es la longitud de estiramiento requerida para fabricar un acoplador con una razón de acoplamiento específica. Para los experimentos se fabricaron acopladores con diferente razón de acoplamiento, esto con el fin de determinar diferentes puntos de sensado. Inicialmente estos puntos de sensado se ubicaron en los primeros ciclos de acoplamiento del acoplador.

3.3. Mediciones experimentales y discusión

El arreglo experimental para la medición de cambios de IR en soluciones acuosas se muestra en la Fig. 3.4. En este esquema un acoplador de fibra es montado sobre un portaobjetos de microscopio, los extremos no estrechados del acoplador se fijan con una gota de pegamento, lo cual permite mantener al acoplador suspendido en el aire sin tocar la superficie del portaobjetos; obteniéndose un dispositivo aislado, portátil y de fácil manipulación. El arreglo para el sensor consiste un diodo laser que emite a una longitud de onda de 1550 nm, el cual conectado al puerto de entrada del acoplador P_1 . La transmisión de la luz es detectada por dos fotodiodos, cada uno conectado a los puertos de salida P_3 y P_4 del acoplador de fibra. La respuesta de transmisión del acoplador es monitoreada por un osciloscopio durante el proceso experimental, las especificaciones de los elementos utilizados en este montaje

experimental son especificadas con anterioridad. Los cambios en el IR son detectados cuando una gota de solución de agua con azúcar es depositada sobre la región de acoplamiento del acoplador. De esta forma, los cambios en el IR son percibidos como cambios en la transmisión a la salida del acoplador.

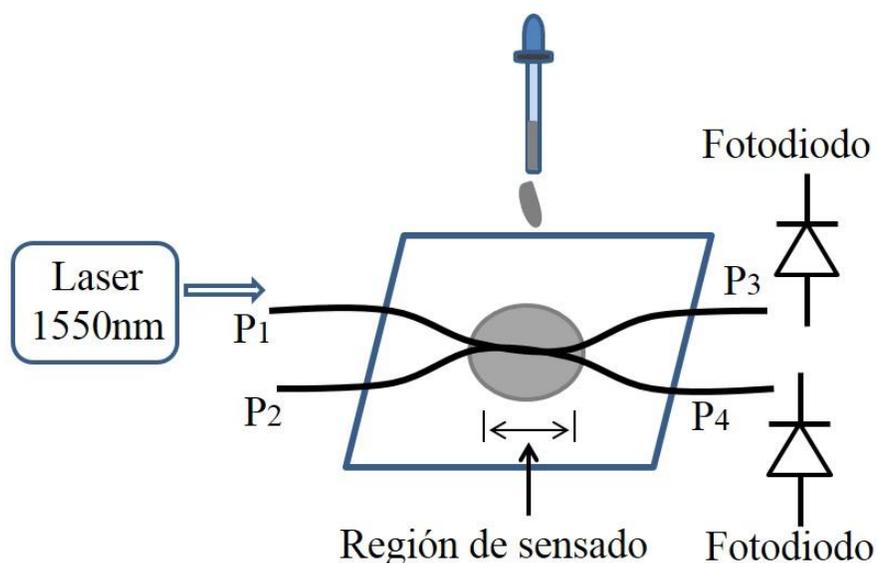


Fig. 3.4. Arreglo experimental para el monitoreo de concentraciones de azúcar en soluciones acuosas.

La sensibilidad del sensor es obtenida midiendo las variaciones de IR de concentraciones de azúcar en agua. Estas concentraciones de azúcar fueron preparadas en dos grupos. El primer grupo consiste de concentraciones de azúcar de 0 a 5 % y el segundo grupo de 5 a 55 %, las concentraciones fueron hechas en una relación masa volumen, disolviendo de 0 a 5 g de azúcar y de 5 a 55 g de azúcar en 100 ml de agua deionizada, esto es 5 % = 5 g/100 ml. Para determinar el punto de operación más adecuado y medir las variaciones de IR, se fabricaron seis acopladores con diferentes razones de acoplamiento. La Fig. 3.5 muestra los puntos de operación usados para determinar el funcionamiento del acoplador. Los puntos A, B y C fueron usados para la medición de soluciones de azúcar en agua de alta concentración, mientras que los puntos D, E y F fueron usados para la medición de soluciones de azúcar en agua de baja concentración. El recuadro en la figura

muestra una imagen de microscopio de un corte transversal en la zona de la cintura del acoplador. Como se puede notar este tipo de acopladores tienen la sección transversal débilmente fusionada.

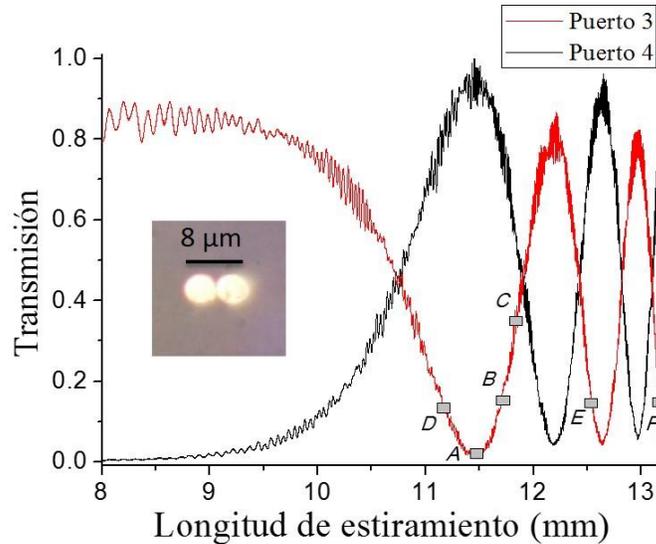


Fig. 3.5. Puntos de operación usados para determinar el funcionamiento del acoplador como sensor de IR. El recuadro muestra una sección transversal débilmente fusionada para el acoplador en el punto A.

El primer conjunto de experimentos fue llevado a cabo operando al acoplador en los puntos de sensado *A*, *B*, y *C*. El primer punto llamado *A* tuvo una razón de acoplamiento 93:05 en aire, y el proceso de fabricación fue detenido a 11.4 mm de estiramiento, para el punto *B* el dispositivo fue fabricado con una razón de acoplamiento de 82:15 en aire con 11.7 mm de estiramiento y el dispositivo trabajando en el punto *C* tuvo una razón de 57:34 en aire y el proceso fue detenido en 11.8 mm de estiramiento. Para este conjunto de mediciones las concentraciones de azúcar en agua fueron variadas en el rango de 0 a 55 %. Los valores de los IR para esas concentraciones de azúcar fueron adaptadas de los valores reportados en [21]. La Fig. 3.6 muestra la respuesta en transmisión de potencia para los acopladores en los puntos de operación *A*, *B*, y *C*; la cual es dada como la variación de la potencia normalizada medida como la razón entre la diferencia y la suma de

las potencias complementarias de salida P_3 y P_4 del acoplador de fibra. Obsérvese que estas gráficas muestran los valores de la respuesta en transmisión a partir de una concentración de 0 % equivalente a agua y las razones de acoplamiento mencionadas anteriormente son especificadas cuando el acoplador está suspendido en aire.

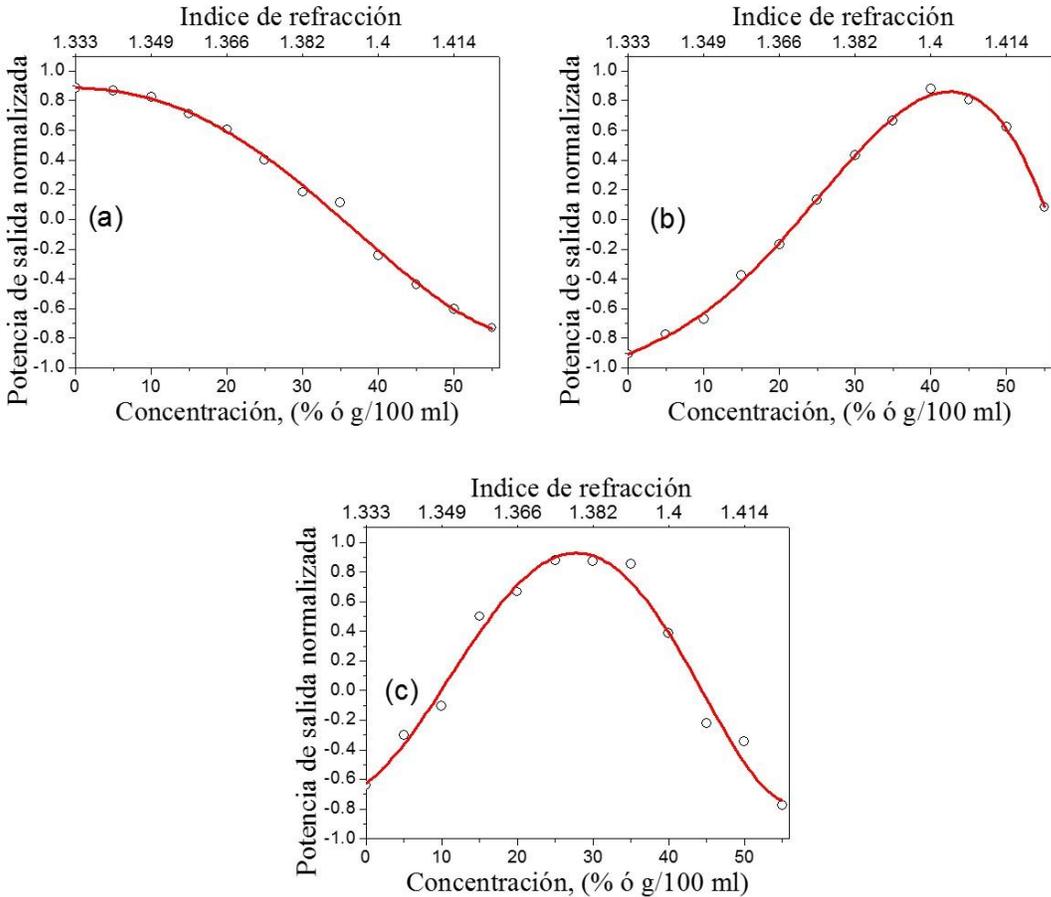


Fig. 3.6.- Variación de la potencia normalizada de salida para tres acopladores trabajando en diferentes puntos de sensado. (a) Punto de sensado (A), (b) Punto de sensado (B), y (c) Punto de sensado C. Las concentraciones de soluciones de azúcar fueron variadas en el rango de 0 a 55 % (gramos de soluto en 100ml de agua deionizada).

Como se puede notar, la transmisión exhibe una respuesta de transmisión sinusoidal. Para aplicaciones prácticas el dispositivo debe ser operado en la región

lineal de la respuesta sinusoidal, permitiendo una relación lineal entre la concentración de azúcar y la señal de salida. Este punto de operación fue encontrado experimentalmente y corresponde al punto de sensado D , como se ilustra en la Fig. 3.5. Para esta situación el acoplador fue fabricado con una razón de acoplamiento de 13:84 en aire y el proceso de fabricación fue detenido a 11.2 mm de estiramiento. La Fig. 3.7 (a) muestra las características de acoplamiento cuando el acoplador es operado en el punto de sensado D . Como se puede observar, la transmisión es lineal para bajas concentraciones de azúcar, y gradualmente desarrolla una respuesta sinusoidal alcanzando su valor máximo para una concentración de azúcar de 45 %. Para intereses prácticos, la sensibilidad del dispositivo es cuantificada para bajas concentraciones de azúcar en el rango de 0 a 5 %. La Fig. 3.7 (b) muestra la respuesta de transmisión lineal para el régimen de bajas concentraciones de azúcar. Para este caso, la sensibilidad alcanzada con el esquema propuesto es medida como 0.03 (1/%) . El límite de detección es determinado por el nivel de ruido de la señal, el cual es originado por las fluctuaciones del láser y los ruidos asociados a los circuitos electrónicos. En los resultados, el ruido es reducido promediando sobre un periodo de 1 minuto aproximadamente en el osciloscopio, y este es medido como 0.0018 unidades de transmisión. Por lo tanto, el mínimo límite de detección para este caso es de 0.06 (wt%).

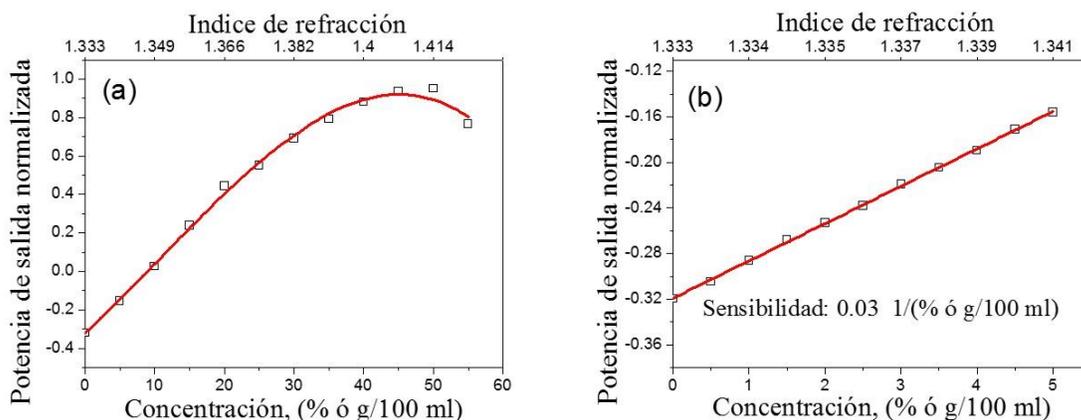


Fig. 3.7. Respuesta de transmisión para el acoplador en el punto D . (a) Altas concentraciones de soluciones de azúcar. (b) Bajas concentraciones de soluciones de azúcar.

Debido al fuerte interés en mejorar la sensibilidad del acoplador, se propuso la operación del acoplador en ciclos de acoplamiento posteriores a los iniciales. Para este propósito el acoplador es fabricado para operar en el punto de sensado *E* y *F*, como se muestra en la Fig. 3.5, correspondiente al segundo y tercer ciclo de acoplamiento, respectivamente. Para el punto de sensado *E*, el rango de acoplamiento corresponde a 12:83 en aire, cuando el proceso de estiramiento fue detenido a 12.5 mm. La respuesta en transmisión para el sensor en el punto *E* para soluciones con bajas concentraciones de azúcar es mostrada en la Fig. 3.8. Como se puede observar, se obtiene una mejora significativa en la sensibilidad. La sensibilidad medida es de 0.08 (1/%) . De manera adicional el funcionamiento del sensor se mejora cuando se opera en el punto *F*. En este punto de sensado la razón de acoplamiento fue de 15:84 en aire, cuando el proceso de estiramiento se detuvo a 13.1 mm. La sensibilidad medida es mejorada a un valor de 0.15 (1/%) ; esto significa un incremento considerable en la sensibilidad del dispositivo. La respuesta en transmisión para estos casos en particular es mostrada en la Fig. 3.8.

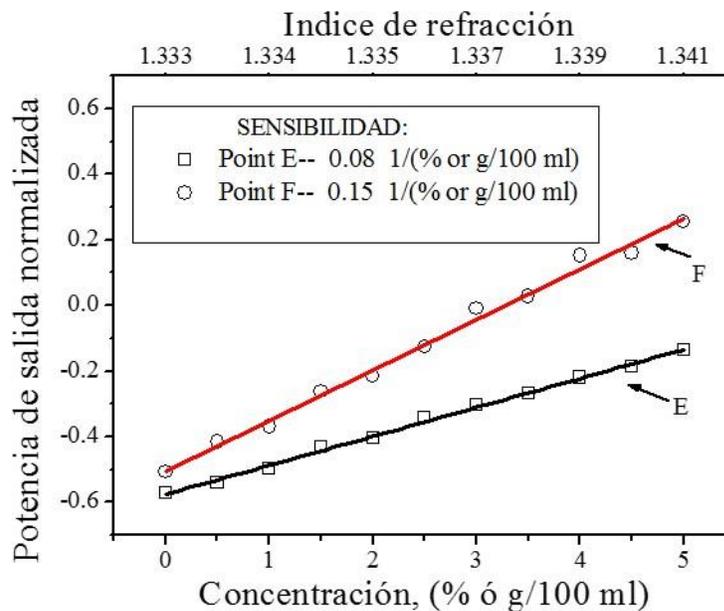


Fig. 3.8. La sensibilidad es incrementada cuando el sensor basado en el acoplador de fibra es operado ciclos de acoplamiento posteriores a los iniciales. Los cuadrados y círculos corresponden a la sensibilidad para los puntos de sensado *E* y *F* respectivamente.

Operando el acoplador en ciclos de acoplamiento posteriores a los iniciales, es posible lograr una sensibilidad mejorada 0.15 (1%) con un mínimo límite de detección de 0.012 (wt%). Para propósitos de estimación, el cambio mínimo detectable de IR es medido usando los valores reportados en [22] para diferentes soluciones de concentraciones de sacarosa en el rango de 0 a 5 %. La mínima variación detectable de IR es estimada como 2.27×10^{-5} RIU. Si comparamos este resultado con los artículos recientemente reportados, este resultado experimental puede ser considerado dentro de los mejores resultados reportados en el marco de los sensores de IR basados en acopladores de fibra óptica cuya operación recae en transmisión de potencia [2].

3.4. Conclusiones

En resumen, se propuso y desarrolló un acoplador bicónico de fibra óptica para la detección de pequeños cambios en el IR de soluciones acuosas. La sensibilidad del esquema propuesto es demostrada midiendo variaciones de IR de concentraciones de azúcar en agua. Concentraciones de azúcar en el rango de 0 a 55 % y 0 a 5 % fueron utilizadas en los experimentos. La sensibilidad lograda con el esquema propuesto fue de 0.03 (1%) con un límite de detección de 0.06 (wt%). Mejoras en la sensibilidad son obtenidas operando al acoplador en ciclos de acoplamiento posteriores a los iniciales; se obtuvo una sensibilidad mejorada de 0.15 (1%) y un mínimo límite de detección de 0.012 (wt%). El cambio mínimo detectable de IR en nuestro sistema es estimado como 2.27×10^{-5} RIU para IR entre 1.333 y 1.341. Estos resultados proporcionan información útil para pruebas con modelos teóricos y para el mejoramiento del dispositivo.

3.5. Referencias

- [1] R. G. Lamont, D. C. Johnson, and K. O. Hill, "Power transfer in fuse biconical-taper single-mode fiber coupler: Dependence on external refractive index," *Appl. Optics*, vol. 24, no. 3, pp. 327–332, 1985.
- [2] T. Tazawa, T. Kanie, and M. Katayama, "Fiber-optic coupler based refractive index sensor and its application to biosensing," *Appl. Phys. Lett*, vol. 91, pp. 113901–113903, Sep. 2007.
- [3] K. Jedrzejewsky, "Biconical fused taper –a universal fibre devices technology," *Opto-Electronics Review*, vol. 8, no. 2, pp. 153-159, 2000.
- [4] Z. Chen, J. Shi, P. Fufei, and W. Tingyun, "Measuring liquid-refractive- index based on a fused fiber-optic coupler," in *Proc. Inst. Eng. Technol. Conf. Wireless, Mobile and Sensor Networks*, 2007, pp. 893-896.
- [5] K. T. Kim and K. H. Park, "Fiber-Optic Temperature Sensor Based on Single Mode Fused Fiber Coupler," *J. Opt. Soc. Korea*, vol. 12, no. 3, pp. 152-156, Sep. 2008.
- [6] K. T. Kim, K. J. Cho, K. Im, Se-J. Baik, Cherl-H. Lee, and J. Lee, "High sensitivity refractive index sensor based on a wet-etched fused fiber coupler," *IEEE Sens. J*, vol. 11, no. 7, pp. 1568-1572, Jul. 2011.
- [7] L. Bo, P. Wang, Y. Semenova, and G. Farrell, "High Sensitivity Fiber Refractometer Based on an Optical Microfiber Coupler," *IEEE Photonic. Tech. L*, vol. 25, no. 3, pp. 228-230, Feb. 2013.
- [8] C. R. Liao, D. N. Wang, X. He, and M. W. Yang, "Twisted optical microfibers for refractive index sensing," *IEEE Photonic. Tech. L*, vol. 23, no. 13, pp. 848–850, Jul. 2011.
- [9] P. Wang, M. Ding, G. Brambilla, Y. Semenova, Q. Wu and G. Farrell, "High temperature performance of an optical microfiber coupler and its potential use as a sensor," *Electron. Lett*, vol. 48, no. 5, pp. 283-284, Mar. 2012.
- [10] Y. Semenova, L. Bo, P. Wang, S. Mathews, Q. Wu, M. Teng, C. Yu and G. Farrell, "Experimental study of temperature response of a microfiber coupler sensor with a liquid crystal overlay," in *Proc. Fifth European Workshop on Optical Fibre Sensors*, vol. 8794, 2013.

- [11] L. Bo, C. C. O'Mahony, Y. Semenova, N. Gilmartin, P. Wang, and G. Farrell, "Microfiber coupler based label-free immunosensor," *Opt. Express*, vol. 22, no. 7, pp. 8150-8155, Apr. 2014.
- [12] L. Bo, P. Wang, Y. Semenova, and G. Farrell, "Optical microfiber coupler based humidity sensor with a polyethylene oxide coating," *Microw. Opt. Techn. Lett.*, vol. 57, no. 2, pp. 457-459, Feb. 2015.
- [13] D. K. C. Wu, B. T. Kuhlmeiy, and B. J. Eggleton, "Ultrasensitive photonic crystal fiber refractive index sensor," *Opt. Lett.*, vol. 34, no. 3, pp. 322-324, 2009.
- [14] C. Zhou, Y. Zhang, L. Xia, D. Liu, "Photonic crystal fiber sensor based on hybrid mechanisms: Plasmonic and directional resonance coupling," *Opt. Commun.*, vol. 285, pp. 2466-2471, Jan. 2012.
- [15] J. R. Guzman-Sepulveda, V. I. Ruiz-Perez, M. Torres-Cisneros, J. J. Sanchez-Mondragon, and D. A. May-Arrijoja, "Fiber optic sensor for high-sensitivity salinity measurement," *IEEE Photonic. Tech. L.*, vol. 25, no. 23, pp. 2323-2326, Oct. 2013.
- [16] D. Chen, G. Hu, B. Peng, G. Wu, and H. Y. Tam, "Theoretical analysis of temperature sensor based on dual-core fiber," *Chin. Opt. Lett.*, vol. 10 pp. s10601-1-s10601-4, Jun 2012.
- [17] F. P. Payne, R. Finegan, M. S. Yataki, R. J. Mears, and C. D. Hussey, "Dependence of fused taper couplers on external refractive index," *Electron. Lett.*, vol. 22, no. 22, pp. 1207-1209, Oct. 1986.
- [18] K. E. Zinoviev, A. B. González-Guerrero, C. Domínguez, and L. M. Lechuga, "Integrated Bimodal Waveguide Interferometric Biosensor for Label-Free Analysis," *J. Lightwave. Technol.*, vol. 29, no. 13, pp. 1926-1930, May 2011.
- [19] B. S. Kawasaki, K. O. Hill, and R. G. Lamont, "Biconical-taper single-mode fiber coupler," *Opt. Lett.*, vol. 6, no. 7, pp. 327-328, 1981.
- [20] T. A. Birks, Y. W. Li, "The shape of fiber tapers," *J. Lightwave. Technol.*, vol. 10, no. 4, pp. 432-438, Apr 1992.
- [21] W. M. Yunus, A. A. Rahman, "Refractive index of solutions at high concentrations." *Appl. Optics*, vol. 27, no. 16, pp. 3341-3343, Aug 1988.

- [22] L. Jiang, L. Zhao, S. Wang, J. Yang and H. Xiao, "Femtosecond laser fabricated all-optical fiber sensors with ultrahigh refractive index sensitivity: modeling and experiment," *Opt. Express*, vol. 19, no. 18, pp. 17591-17598, Aug. 2011.

Capítulo 4

Optimización de parámetros para la medición de cambios en el índice de refracción usando acopladores de fibra óptica.

En este capítulo se presenta un esquema que optimiza los parámetros en la medición de los cambios de índice de refracción (IR) usando acopladores bicónicos. Haciendo uso de un láser sintonizable (TL) es posible medir las variaciones de IR mediante un barrido espectral. Esta medición está basada en la respuesta espectral del acoplador, con la cual estimamos la sensibilidad del acoplador en respuesta en transmisión y en desplazamiento de longitud de onda. La sensibilidad mejorada bajo el régimen de transmisión de potencia es de 0.458 unidades de transmisión por unidad de concentración de azúcar (1%), con un mínimo límite de detección de 0.003 porcentaje de peso de concentración de azúcar (wt%), la variación mínima detectable se estimó en 4.89×10^{-6} RIU. La máxima sensibilidad del acoplador en desplazamiento de longitud de onda fue medida en 2350 nm/RIU.

4.1. Introducción

Existe un reciente interés en sensores basados en fibras ópticas estrechadas debido a su bajo costo de fabricación, alta sensibilidad e inmunidad a la interferencia electromagnética externa. Cuando se tiene un diámetro en la fibra muy pequeño, gran parte de la energía se propaga a través del campo evanescente, el cual interactúa con el medio circundante; siendo este el principal fenómeno explotado para la fabricación de sensores basados en fibras estrechadas. Una ventaja adicional en este tipo de sensor es que pueden empalmarse fácilmente a los sistemas de fibra óptica, puesto que sus extremos permanecen inalterados, y permiten una integración con bajas pérdidas con otros componentes de fibra óptica. Existen diversas investigaciones de las fibras estrechadas y su aplicación como

sensores, algunos ejemplos incluye el uso de fibras estrechadas para la medición de humedad [1], desplazamiento [2], temperatura [3-5] pero el nuestro interés se focaliza en la medición de cambios de IR de un medio externo [6-9]. En este capítulo se presenta la optimización del sensor de IR basado en un acoplador bicónico de fibra óptica mostrado en el capítulo 4 [10].

En los trabajos previos de investigación [11-13], cuyo contenido se basa en la medición del índice o variaciones del IR, podemos destacar dos tipos de codificación en los sensores reportados, la codificación en potencia y la codificación en longitud de onda, ambas formas muy robustas de codificar la información, por lo que este tipo de sensores presentan un interés intrínseco destacable. Empleando la codificación en potencia, los acopladores bicónicos de fibra óptica pueden operar como elemento sensor gracias al campo evanescente que rodea al acoplador, de esta forma las variaciones en el IR exterior se perciben como una variación en la potencia transmitida a la salida del acoplador. Una de las ventajas de sensar en el régimen de transmisión de potencia es evitar el uso de equipos costosos como espectrómetros. Por otra parte, la codificación en longitud de onda, basa su operación en la medición de la respuesta espectral del dispositivo, de esta forma las variaciones en el IR se obtienen al cuantificar el corrimiento en longitud de onda de la respuesta espectral producida. Este régimen de medición ha sido el más analizado en las investigaciones recientes, donde sensores basados en fibras estrechadas han reportado valores de sensibilidad tan altos como 18681.82 nm/RIU (refractive index unit) [6].

Como se demostró en el capítulo anterior, al seleccionar puntos de sensado posteriores al primer ciclo inicial de acoplamiento, es posible mejorar de manera significativa la respuesta del sensor. En este capítulo nuestro propósito es llevar al límite el sistema experimental y operar al acoplador en ciclos de acoplamiento muy posteriores al inicial, donde la transferencia de energía entre los puertos de salida es muy rápida. Como ilustración, en la Fig. 4.1 (a) se muestra la firma de estiramiento de un acoplador bicónico de fibra óptica, el cual es estrechado para tener un diámetro final de 1 μm , una sección uniforme de 2.5 mm y una longitud

total de 24.5 mm. La Fig. 4.1 (b) muestra el intercambio de energía entre los puertos 3 y 4 de este acoplador en la parte final del proceso de fabricación, donde el intercambio de energía ocurre a una razón de 24 ciclos por segundo y el diámetro en el acoplador se estima en 5 μm . Debido a la velocidad que presentan los cambios de energía, la fabricación de un acoplador con una razón de acoplamiento específica es muy complicada. Por lo tanto, en nuestro esquema experimental hemos integrado como fuente de luz un TL (de 1520 a 1570 nm) que nos permite, mediante la sintonización en longitud de onda, seleccionar al acoplamiento deseado. Con este nuevo esquema es posible realizar mediciones simultáneas de la transmisión de potencia y del desplazamiento en longitud de onda de la respuesta espectral del acoplador.

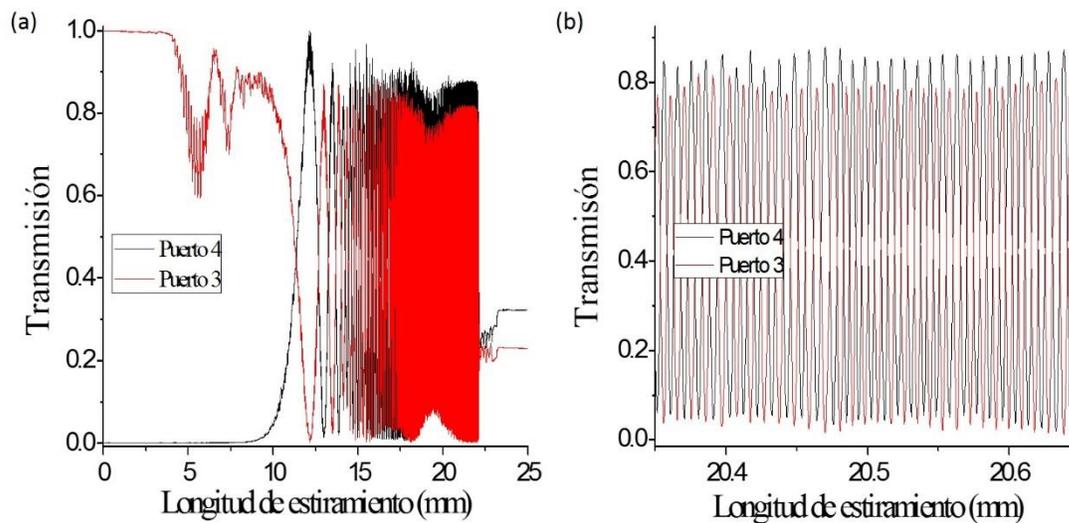


Fig. 4.1. (a) Firma de estiramiento de un acoplador bicónico de fibra óptica de 23 mm de longitud y diámetro final de 1 μm . (b) Intercambio de energía entre los puertos de salida en la parte final del proceso de fabricación.

En este capítulo nuestro propósito es llevar al límite la fabricación del acoplador y analizar de forma experimental la mejoría en la respuesta del dispositivo. Con este fin, y de forma similar a los experimentos anteriores, la variación en el IR se obtiene empleando diferentes concentraciones de azúcar en agua. Experimentalmente hemos encontrado que el diámetro más pequeño con el cual podemos manipular al

acoplador sin que se rompa es de 5 μm . Para los experimentos preparamos concentraciones de azúcar en agua del 0 a 10 %, y se realizaron tres series de experimentos con acopladores de diferente longitud, todos manteniendo un diámetro de 5 μm , logrando una sensibilidad mejorada en el régimen de transmisión de potencia de 0.458 (1/%) y un mínimo límite de detección de 0.003 (wt%). La variación mínima detectable de IR se estimó en 4.89×10^{-6} RIU. La máxima sensibilidad del acoplador en desplazamiento de longitud de onda se estimó en 2350 nm/RIU.

4.2. Modificación del arreglo experimental para la fabricación de acopladores bicónicos de fibra óptica y para la medición de IR en soluciones de azúcar en agua

En el capítulo anterior se mostró que para ciclos iniciales los acopladores pueden ser fabricados con una razón de acoplamiento específica, esto principalmente debido a que el intercambio de energía entre los puertos de salida es relativamente lento. De esta forma un acoplador puede fabricarse deteniendo el proceso de estiramiento cuando se aprecia el acoplamiento deseado. También se mostró que es posible fabricar un acoplador que genere una respuesta lineal entre la transmisión de potencia normalizada y la variación del IR externo. Sin embargo, para ciclos de intercambios rápidos de energía se vuelve complicado el definir una razón de acoplamiento específica. Para resolver esto, se implementó un esquema alternativo usando un TL como fuente emisora de luz, permitiéndonos sintonizar mediante longitud de onda el acoplamiento deseado. El arreglo para la fabricación de acopladores en ciclos de acoplamientos rápidos se observa en la Fig. 4.2. La luz de un TL es introducida a un acoplador 99/1, dejando la salida de 1 % como señal de monitoreo y el 99 % introducida a un circulador, el cual es utilizado como aislador. La luz proveniente del circulador pasa por un control de polarización (CP) y posteriormente al puerto P_1 del acoplador. La máquina para la fabricación de fibras ópticas estrechadas por fusión y estiramiento (MFFOE) es controlada mediante un control electrónico el cual contiene los parámetros para la fabricación de fibras estrechadas [14]. Durante el proceso de fabricación, dos fotodiodos reciben la

potencia transmitida y se visualiza en un osciloscopio. La fibra óptica usada para la fabricación de acopladores es una fibra monomodo estándar (SMF, single mode fiber) modelo Corning SMF-28.

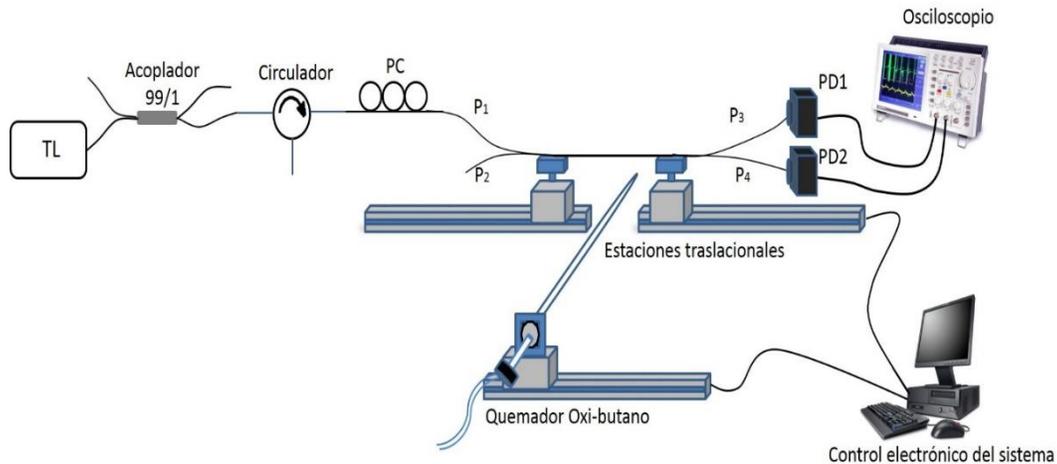


Fig. 4.2. Arreglo experimental para la fabricación de acopladores bicónicos de fibra óptica en ciclos de acoplamiento muy posteriores a los iniciales.

Se fabricaron tres acopladores bicónicos, todos con un diámetro final de $5 \mu\text{m}$, pero con longitudes totales de 15.5, 16 y 19.5 mm, respectivamente. Para los dos primeros acopladores las longitudes del cuello fueron de 2 mm de longitud, mientras que para el tercero la longitud del cuello fue de 2.5 mm con transiciones de 7 y 8 mm, respectivamente. Estos acopladores presentaron bajas pérdidas en su fabricación, alrededor de 0.5 dB, y cumplen con el criterio de adiabaticidad para acopladores bicónicos de fusión débil [15].

La medición de los espectros se realizó mediante el montaje experimental que se muestra en la Fig. 4.3. El acoplador se posiciona sobre un portaobjetos de microscopio, el cual se fija en sus extremos manteniéndolo suspendido en el aire. Un generador de pulsos, marca Stanford Research Systems modelo DG535, genera un pulso de sincronización para simultáneamente disparar el TL y monitorear la potencia transmitida en el osciloscopio. Cuando el TL recibe la señal de disparo (0.1 V) se activa el barrido recorriendo la ventana espectral de 1520 a 1570 nm, con una velocidad de 1 nm/seg, esta velocidad de barrido puede ser controlada para efectos

de disminución del ruido. La señal óptica de la respuesta espectral es detectada por dos fotodiodos y enviada al osciloscopio, donde el cambio en el IR que rodea al acoplador es percibido como un desplazamiento en longitud de onda. Las concentraciones de azúcar usadas para cambiar el IR externo fueron preparadas en el régimen de masa y fueron divididas en dos grupos. El primer grupo comprende concentraciones de 0 a 10 % en incrementos de 1 %, el segundo grupo comprende concentraciones de 0 a 1 % en incrementos de 0.1 %. Cada vez que se depositó una diferente concentración de azúcar fue necesario lavar el acoplador con gotas de agua deionizada.

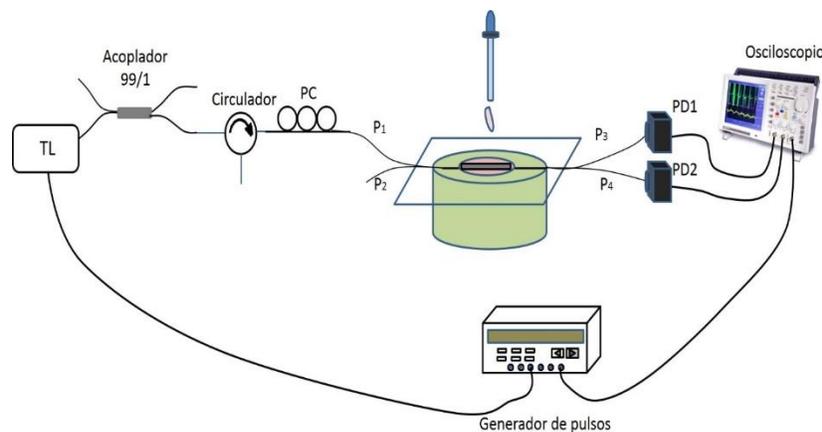


Fig. 4.3. Arreglo experimental para la medición de variaciones de IR de concentraciones de azúcar en agua en respuesta en transmisión de potencia y en desplazamiento de longitud de onda a partir de la respuesta espectral.

Los experimentos de sensado con el acoplador se llevaron a cabo a temperatura ambiente. La Fig. 4.4 muestra como ilustración la respuesta espectral en aire de las de un acoplador de 23 mm de longitud y un diámetro de 1 μm para un rango de longitud de onda de 1520 a 1570 nm. La respuesta espectral esta normalizada como la diferencia en potencia en los puertos de salida dividida entre la suma de las potencias lo cual nos arroja como resultado una transmisión normalizada de -1 a 1. Este espectro de transmisión muestra un periodo de 29 nm para los picos máximos, también se puede observar que el ancho a la mitad del máximo (FWHM, full width at half maximum) es de 14.5 nm. Una de las ventajas que tenemos al usar un TL es que podemos operar al acoplador a cualquier razón de acoplamiento. En este caso

si el acoplador se desea operar a una razón de acoplamiento 50/50 debemos sintonizar una longitud de onda de operación de 1546 nm. En el recuadro de la figura se aprecia que el acoplador es de fusión débil.

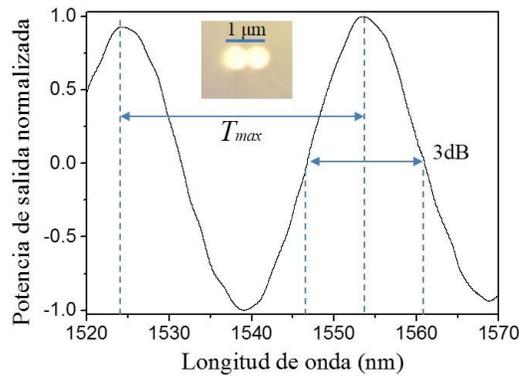


Fig. 4.4. Respuesta espectral en aire de un acoplador de 23mm de largo y un diámetro de 1 μm. El ancho del periodo de los máximos es de 29 nm y el ancho a 3dB es cercano a 14.5 nm.

4.3. Resultados experimentales y discusión

La medición se realizó manteniendo inmerso el acoplador en una solución con diferente concentración de azúcar. En el arreglo experimental de la Fig. 4.3, se puede observar como el acoplador es cubierto completamente por la solución de azúcar, después el TL recibe el disparo del generador de pulsos activando el barrido espectral que recorre desde una longitud de onda de 1520 nm hasta 1570 nm a una velocidad de 1 nm/s, esto genera una respuesta espectral que se captura en el osciloscopio y el archivo es guardado para ser procesado mediante software. De este archivo obtenemos los datos para graficar la respuesta espectral, evaluando el desempeño del sensor de dos tipos de codificación: 1) en desplazamiento de longitud de onda y 2) en transmisión de potencia, como se puede observar en la Fig. 4.5.

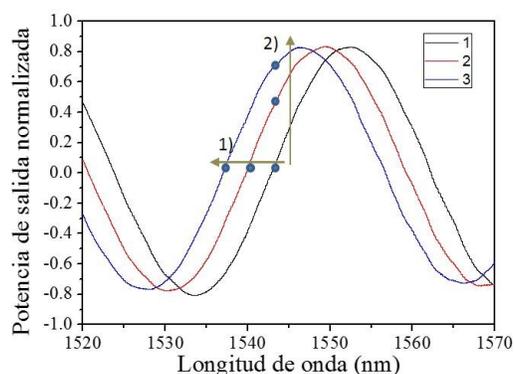


Fig. 4.5. El desempeño de acoplador puede ser evaluado en dos tipos de codificación, 1) por desplazamiento en longitud de onda y 2) por transmisión de potencia.

Es bien conocido que el mejor punto de operación de un acoplador para ser usado como sensor es donde existe una relación lineal entre la potencia transmitida y la variación del IR que rodea al acoplador. La respuesta espectral en sí comprende todos los valores en transmisión de potencia para la ventana espectral que abarca la longitud de onda de 1520 a 1570 nm. De esta forma podemos localizar una relación lineal entre la variación del IR y la transmisión de potencia del acoplador en determinada longitud de onda. A continuación se presentan los resultados en transmisión de potencia y en respuesta espectral para tres acopladores con parámetros diferentes.

Se propuso trabajar con acopladores de diámetros relativamente grandes de aproximadamente 5 μm , ya que poseen la resistencia suficiente para soportar la tensión ejercida cuando las soluciones de azúcar son depositadas sobre estos. Para efectos de estimación de la responsividad del sensor, en todas nuestras mediciones para el régimen de transmisión de potencia, evaluamos la potencia de salida normalizada a una longitud de onda fija, en cada uno de estos casos, donde la potencia del acoplador es 0 para la concentración de azúcar de 0 %. Por otro lado, para el análisis en respuesta espectral, los desplazamientos de longitud de onda fueron evaluados a una potencia de salida normalizada fija, en estos casos a 3dB [5]. La primera medición se realizó utilizando un acoplador de 16 mm de largo con

un diámetro final de 5 μm y una longitud de cuello de 2 mm. Es necesario mencionar que el proceso de fabricación se detuvo antes de terminar ya que para este caso en especial el proceso estaba establecido para finalizar con un diámetro de 1 μm , con lo cual su longitud final hubiese sido de 23 mm. La Fig. 4.6 (a) muestra la relación entre la potencia de salida normalizada y las concentraciones de azúcar a una longitud de onda fija de 1542.83 nm. Para este caso, la sensibilidad optimizada obtenida de la pendiente de la parte lineal de la curva de transmisión fue de 0.11 (1/%). El límite de detección está determinado por el nivel de ruido de la señal, el cual fue promediado en un periodo de 1 minuto y está calculado como 0.0016 unidades de transmisión. Por lo tanto, el límite de detección para este caso es de 0.014 (wt%). La figura 4.6 (b) muestra la respuesta espectral del acoplador para cada una de las concentraciones de azúcar entre 0 y 10 %. La figura 4.6 (c) muestra la relación entre el IR del medio que rodea al acoplador y el desplazamiento en longitud de onda de la respuesta espectral del acoplador. La estimación de la sensibilidad promediada en términos de desplazamiento de longitud de onda es de 670 nm/RIU sobre un rango de IR entre 1.333 y 1.349. Para propósitos de estimación, los valores de IR para las concentraciones de azúcar fueron obtenidos de [16].

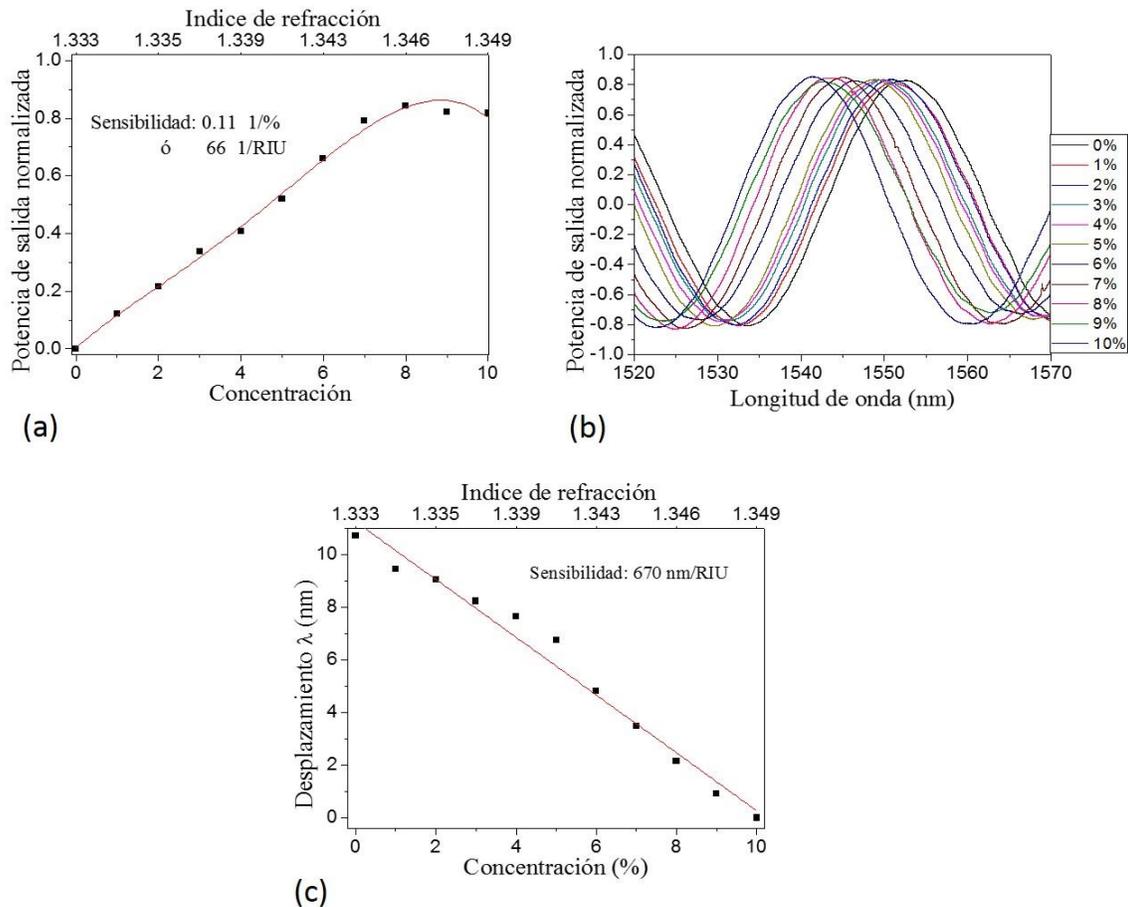


Fig. 4.6. Mediciones realizadas para un acoplador de 16 mm de largo con un diámetro final de 5 μm . (a) Sensibilidad estimada de 0.11 (1%) en el régimen de transmisión de potencia. (b) Respuesta espectral para concentraciones entre 0 y 10 % o IR de 1.333 a 1.349. (c) Sensibilidad calculada de 670 nm/RIU en desplazamiento de longitud de onda.

Para el segundo experimento se utilizó un acoplador bicónico con un diámetro final de 5 μm , una longitud de cuello de 2 mm y una longitud total al termino del proceso de 17.6 mm. La longitud de onda fija para la medición de la potencia de salida normalizada fue en 1559.73 nm. La respuesta en transmisión de potencia para este sensor para concentraciones de 0 a 10 % o variaciones de IR de 1.333 a 1.349 es mostrada en la Fig. 4.7 (a). Se puede observar que existe una mejoría en la sensibilidad, la cual es estimada con un valor de 0.129 (1%), por lo tanto, el límite

de detección para este caso es calculado como 0.012 (wt%). La Fig. 4.7 (b) muestra la respuesta espectral para las soluciones acuosas de 0 a 10 % de concentración de azúcar. En la Fig. 4.7 (c) se observa la sensibilidad estimada para este acoplador en desplazamiento de longitud de onda como 716 nm/RIU.

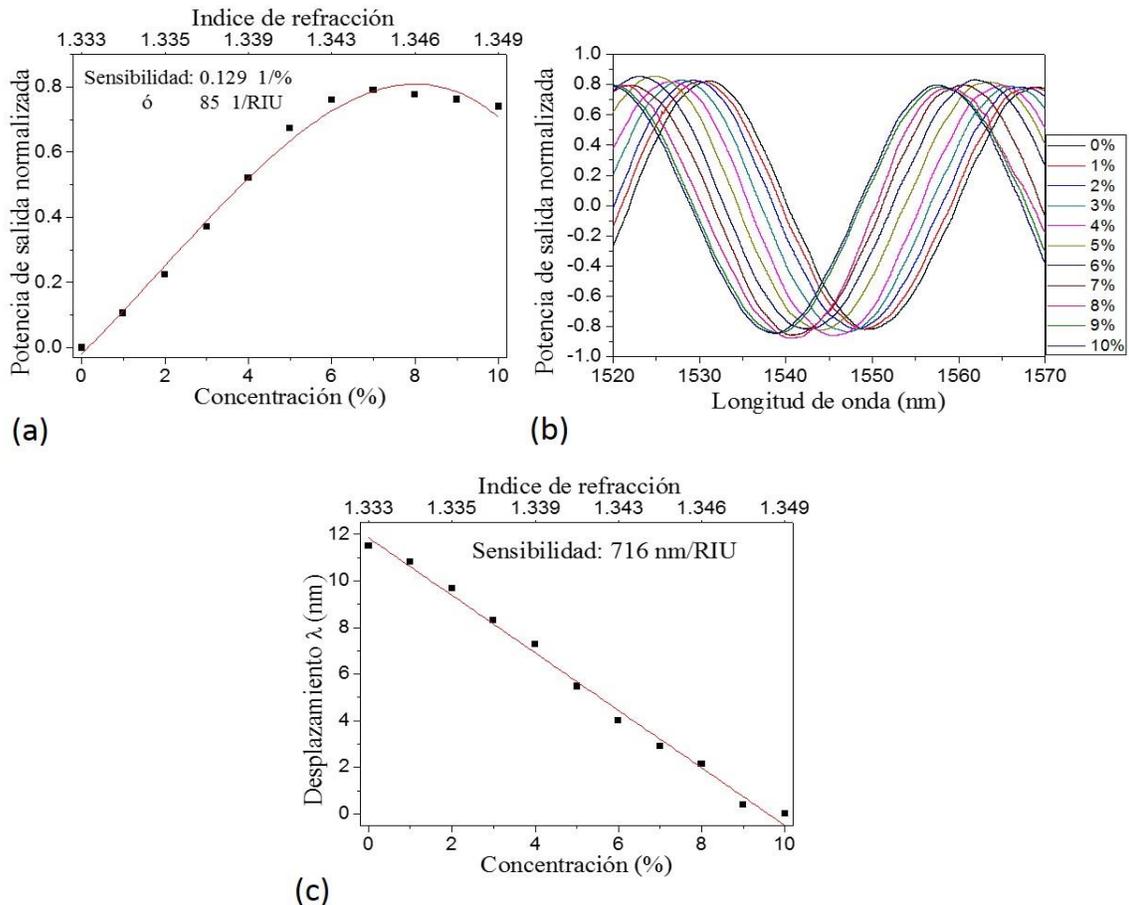


Fig. 4.7. Mediciones realizadas para un acoplador de 17.6 mm de largo con un diámetro final de 5 μm (a) La sensibilidad calculada en el régimen de transmisión de potencia es de 0.129 (1%). (b) Respuesta espectral para concentraciones entre 0 y 10 % ó IR de 1.333 a 1.349. (c) La sensibilidad calculada en desplazamiento de longitud de onda de 716 nm/RIU.

Debido al fuerte interés en mejorar la sensibilidad del sensor, se propuso la fabricación de un acoplador con un punto de sensado situado en ciclos de

acoplamiento muy posteriores a los ciclos iniciales donde los intercambios de energía ocurren muy rápidamente. Dicho acoplador resultó con un diámetro final de 5 μm , una longitud de cuello de 2.5 mm y al final del proceso tuvo una longitud total de 21.5 mm. Con este acoplador se realizaron experimentos con dos grupos de concentraciones de azúcar. El primer grupo consistió de concentraciones de azúcar de 0 a 10 % con IR de 1.333 a 1.349, el segundo grupo consistió de concentraciones de azúcar de 0 a 1 % con IR de 1.333 a 1.3344. La sensibilidad mejorada medida a una longitud de onda fija de 1557.65 nm para concentraciones de azúcar con IR entre 1.333 y 1.349 es de 0.458 (1/%) y se muestra en la Fig. 4.8 (a), entonces el mínimo límite de detección en el régimen de transmisión de potencia es de 0.003 (wt%). La Fig. 4.8 (b) muestra la respuesta espectral para concentraciones de azúcar de 0 a 10 %. La Fig. 4.8 (c) muestra la sensibilidad mejorada obtenida en desplazamiento de longitud de onda con un valor estimado de 1036 nm/RIU para concentraciones de azúcar de 0 a 10 %. Para propósitos de comparación se estimó una mínima variación detectable en el régimen de transmisión de potencia de 4.89×10^{-6} RIU.

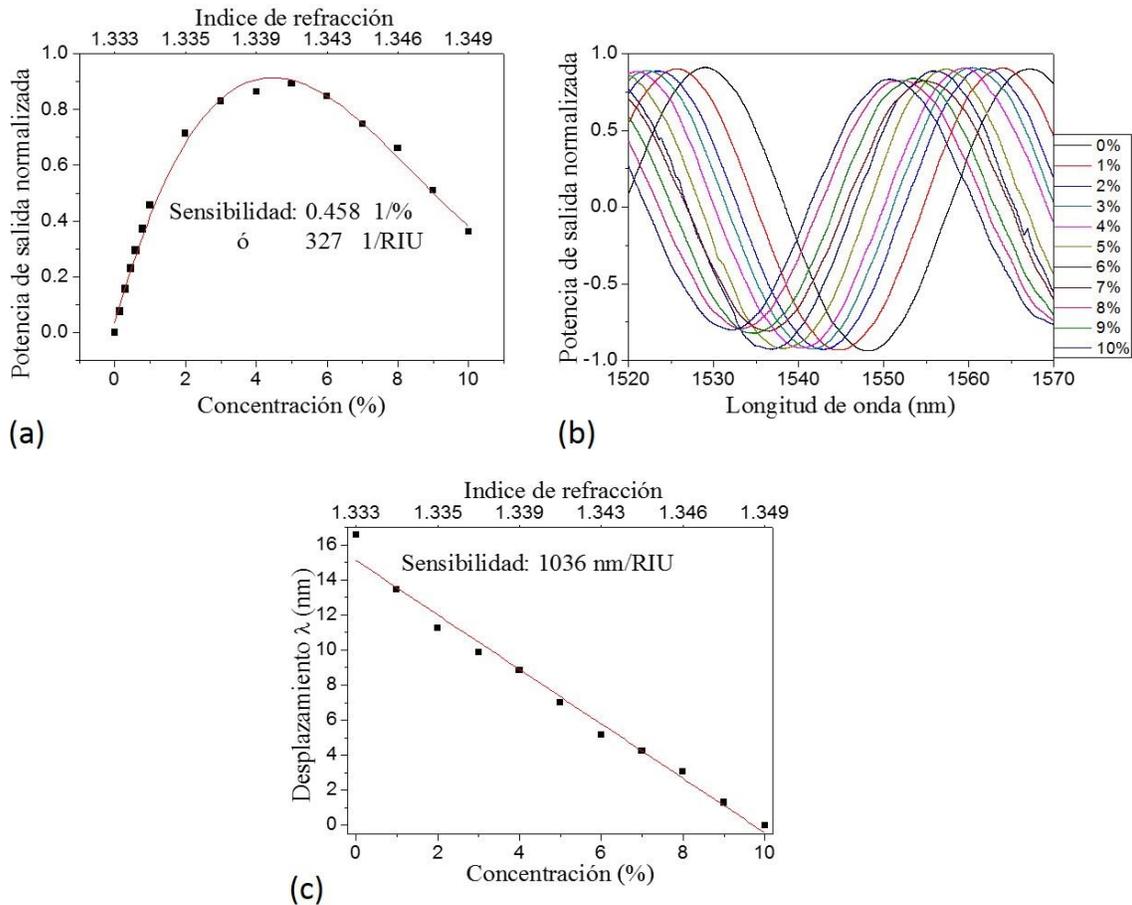


Fig. 4.8. Mediciones para un acoplador de 21.5 mm de largo con diámetro final de 5 μ m. (a) La sensibilidad en el régimen de transmisión de potencia es de 0.458 (1/%) con un límite mínimo de detección de 4.89×10^{-6} RIU. (b) Curvas de respuesta espectral para concentraciones de 0 a 10% ó IR de 1.333 a 1.349. (c) Sensibilidad mejorada en desplazamiento de longitud de onda con un valor de 1036 nm/RIU.

De la Fig. 4.8 (a) se observa que existe una pendiente abrupta en la curva de transmisión para una concentración de 0 a 1 %, por lo tanto, se propuso realizar el experimento en este rango de concentración de azúcar utilizando muestras de concentración en incrementos de 0.1 % donde los IR están entre 1.333 a 1.3344. Los valores de estos IR fueron adaptados de [17]. En la Fig. 4.9 (a) se observa la respuesta espectral para las concentraciones de 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 y 1%. En la Fig. 4.9 (b) se observa la máxima sensibilidad dada en desplazamiento de longitud de onda para IR de 1.333 a 1.3344 como 2350 nm/RIU.

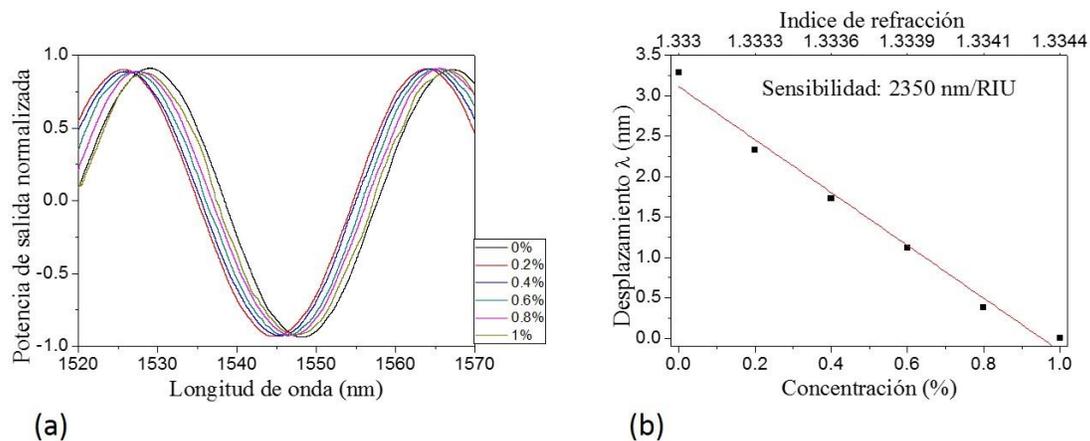


Fig. 4.9. Mediciones para un acoplador de 21.5 mm de largo con un diámetro final de 5 μm . (a) Respuesta espectral para concentraciones de 0 a 1 % ó IR de 1.333 a 1.3344. (b) La máxima sensibilidad lograda en desplazamiento de longitud de onda es de 2350 nm/RIU.

La limitante en la optimización de la sensibilidad es el nivel de resistencia física de las microfibras, bajo este esquema solo se pudo trabajar con acopladores de diámetros de 5 μm . Estos acopladores tienen respuestas aceptables de sensibilidad, sin embargo para incrementos considerables en la pendiente de la parte lineal de la curva de transmisión es necesario trabajar con un arreglo que permita operar al acoplador con diámetros menores a 3 μm . Este capítulo sustenta lo planteado en el capítulo 4 donde establece que el acoplador mejora la sensibilidad al ser operado en ciclos posteriores a los iniciales.

4.4. Conclusiones

En este capítulo se propuso y experimentó con un nuevo esquema para optimizar la medición de cambios de IR en concentraciones de azúcar utilizando acopladores biconicos de fibra óptica. Con el uso del TL y el osciloscopio es posible determinar las variaciones de IR en el régimen de transmisión de potencia y en el régimen de respuesta espectral. La sensibilidad lograda en el régimen de transmisión de

potencia operando acopladores en ciclos donde la transferencia de energía es muy rápida fue de 0.11 (1/%) con un límite de detección de 0.014 (wt%) para concentraciones de 0 a 10 %. La sensibilidad obtenida en desplazamiento de longitud de onda de la respuesta espectral fue de 670 nm/RIU. Al tener un campo evanescente más grande, mayor cantidad de energía es capaz de interactuar con el medio exterior, de esta forma se incrementa la sensibilidad del acoplador, y esto se logra reduciendo el diámetro o alargando la zona de acoplamiento. Tomando esto en cuenta, se logró obtener una sensibilidad mejorada en el régimen de transmisión de 0.458 (1/%), con un límite de detección mínimo de 0.003 (wt%). En términos de desplazamiento de longitud de onda la sensibilidad mejorada fue de 1036 nm/RIU para concentraciones de 0 a 10 %. El cambio mínimo detectable de IR es de 4.89×10^{-6} RIU. La máxima sensibilidad estimada en desplazamiento de longitud de onda para concentraciones de 0 a 1 % con IR de 1.333 a 1.3344 fue de 2350 nm/RIU.

4.5. Referencias

- [1] T.L. Yeo, T. Sun, K.T.V. Grattan “Fibre-optic sensor technologies for humidity and moisture measurement,” *Sens. Actuators, A*, vol. 144, pp. 280–295, 2008.
- [2] M. Yasin, S. W. Harun, Samian, Kusminarto, and H. Ahmad, “Simple design of optical fiber displacement sensor using a multimode fiber coupler” *Laser Phys.* , vol. 19, no. 7 pp. 1446–1449, 2009.
- [3] D. Chen, G. Hu, B. Peng, G. Wu and H. Y. Tam, “Theoretical analysis of temperature sensor based on dual-core fiber,” *Chinese Opt. Lett.*, col. 10, pp. S10601-1 - S10601-4, Jun 2012.
- [4] M. Endong, W. Min, P. Fufei, W. Tingyun, “Fiber optic coupler as sensing probe of temperature sensor,” in *The Eighth International Conf. on Elec. Measur. And Instrum.*, pp. 4-186 – 4-189, 2007.
- [5] M. Ding, P. Wang, G. Brambilla, “Fast-response high-temperature microfiber coupler tip thermometer,” *IEEE. Photonic. Tech. L*, vol. 24, no. 14, Jul. 2012.

- [6] W. B. Ji, H. H. Liu, S. C. Tjin, K. K. Chow and A. Lim, "Ultra-high sensitive refractive index sensor based on optical microfiber," *IEEE Photonic Tech. L.*, vol. 24, no. 20, pp. 1872-1874, Oct. 2012.
- [7] D. K. C. Wu, K. J. Lee, V. Pureur, and B. T. Kuhlmey, "Performance of refractive index sensors based on directional couplers in photonic crystal fibers," *J. Lightwave Technol.*, vol. 31, no. 22, pp. 3500-3510, Nov. 2013.
- [8] P. Polynkin, A. Polynkin, N. Peyghambarian, and M. Mansuripur, "Evanescent field-based optical fiber sensing device for measuring the refractive index of liquids in microfluidic channels," *Opt. Lett.*, vol. 30, no. 11, pp. 1273-1275, Jun. 2005.
- [9] C. R. Liao, D. N. Wang, X. He, and M. W. Yang, "Twisted optical microfibers for refractive index sensing," *IEEE Photonic Tech. L.* vol. 23, no. 13, pp. 848-850, Jul. 2011.
- [10] M. V. Hernández, M. A. Bello-Jiménez, A. Rodríguez and M. V. Andrés, "Experimental investigation of fused biconical fiber couplers for measuring refractive index changes in aqueous solutions," *IEEE Sensors J.*, vol. 16, no. 1, pp. 132-136, Sep. 2015.
- [11] T. Tazawa, T. Kanie, and M. Katayama, "Fiber-optic coupler based refractive index sensor and its application to biosensing," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 91, pp. 113901-113903, Sep. 2007.
- [12] L. Bo, P. Wang, Y. Semenova, and G. Farrell, "High Sensitivity Fiber Refractometer Based on an Optical Microfiber Coupler," *IEEE Photonic Tech. L.*, vol. 25, no. 3, pp. 228-230, Feb. 2013.
- [13] K. R. Sohn, K. T. Kim, J. W. Song, "Optical fiber sensor for water detection using a side-polished fiber coupler with a planar glass-overlay-waveguide," *Sens. Actuators, A*, vol. 101, no. 1-2, pp. 137-142, Sep 2002.
- [14] B. S. Kawasaki, K. O. Hill, and R. G. Lamont, "Biconical-taper single-mode fiber coupler," *Opt. Lett.*, vol. 6, no. 7, pp. 327-328, 1981.
- [15] T. A. Birks, Y. W. Li, "The shape of fiber tapers," *J. Lightwave Technol.*, vol. 10, no. 4, pp. 432-438, Apr 1992.

- [16] W. M. Yunus, A. A. Rahman, "Refractive index of solutions at high concentrations." *Appl. Optics*, vol. 27, no. 16, pp. 3341-3343, Aug 1988.
- [17] L. Jiang, L. Zhao, S. Wang, J. Yang and H. Xiao, "Femtosecond laser fabricated all-optical fiber sensors with ultrahigh refractive index sensitivity: modeling and experiment," *Opt. Express*, vol. 19, no. 18, pp. 17591-17598, Aug. 2011.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajo futuro

A continuación se describen las conclusiones generales del trabajo de tesis y los resultados obtenidos. También se proponen algunas posibilidades para expandir la investigación en el tema orientado al diseño y desarrollo de sensores biomédicos y sensores de combustibles.

5.1. Conclusiones

En este trabajo se demostró de manera experimental que los acopladores bicónicos de fibra óptica fabricados mediante la técnica de fusión y estiramiento pueden ser eficazmente utilizados como sensores para la medición de cambios de índice de refracción (IR) en soluciones acuosas. En nuestro caso particular, la variación del IR se logró empleando diferentes concentraciones de azúcar en agua. La caracterización de los acopladores se realizó empleando dos técnicas de medición, nuestra primer propuesta se basa en medir las variación de IR como variaciones de potencia en transmisión, resultando en un sensor sencillo y de gran precisión el cual no requiere el uso de equipos sofisticados como lo son analizadores de espectros. Y posteriormente se propuso la medición, en conjunto con la transmisión, de la respuesta espectral del dispositivo, la cual basa su operación en la medición del desplazamiento de longitud de onda; ambas técnicas de medición presentan una forma muy robusta de codificar la información, por lo que este tipo de sensores presentan un interés intrínseco destacable.

En lo referente a la fabricación del acoplador, se logró un dispositivo portátil, compacto y altamente sensible, que además al estar compuesto por dos puertos de salida nos permite medir una potencia de salida normalizada de manera directa y así compensar las fluctuaciones en potencia, lo que es muy destacable en este sensor. Para la medición de los cambios de IR en las concentraciones de azúcar, inicialmente se trabajó con acopladores cuyos puntos de sensado estaban situados

en los primeros ciclos de acoplamiento. Los resultados en la medición de cambios de IR mostraron una respuesta sinusoidal en la transmisión de potencia. Para aplicaciones de sensado, y con el propósito de obtener una medición proporcional al cambio en el IR, el acoplador debe operar en la región lineal de la transmisión, lo cual corresponde a una transmisión cercana al 50/50. La sensibilidad es evaluada por la pendiente obtenida de la relación entre la potencia normalizada transmitida y la concentración de azúcar (ó cambio de IR). El mejor resultado presentado en este régimen de operación fue de 0.15 unidades de transmisión normalizada por unidad de concentración de azúcar (1%), y un límite de detección de 0.012 porcentaje de peso de concentración de azúcar (wt%), el cual fue obtenido usando un acoplador de 13.1 mm de largo y 8.5 μm de diámetro en su cintura. En este arreglo el cambio mínimo detectable de IR fue estimado en 2.27×10^{-5} RIU (refractive index unit). La alta sensibilidad y una fabricación relativamente económica hacen que los acopladores sean muy atractivos para su implementación como sensores de IR. Posteriormente, con el propósito de optimizar el funcionamiento del acoplador, llevamos su punto de operación hacia ciclos de acoplamiento muy posteriores al inicial, donde existe una rápida transferencia de energía entre los puertos de salida del acoplador al reducir gradualmente su diámetro. Para este tipo de acoplador se caracterizó tanto en régimen de transmisión de potencia como en régimen de respuesta espectral; haciendo uso de un láser sintonizable (TL) que nos permite mediante sintonización en longitud de onda seleccionar la razón de acoplamiento del dispositivo sensor. De esta manera pudimos obtener la respuesta en transmisión y medir el desplazamiento en longitud de onda a partir de la respuesta espectral del acoplador. En esta serie de experimentos los diámetros de acoplador fueron de 5 μm . Utilizando concentraciones de 0 a 10 %. Nuestro mejor resultado se obtuvo para un acoplador de 21.5 mm de largo y una longitud de cuello de 2.5 mm, logrando mejorar la sensibilidad en el régimen de transmisión a un valor de 0.458 (1%) y un mínimo límite de detección de 0.003 (wt%), la mínima variación detectable de IR es estimada en 4.89×10^{-6} RIU. En desplazamiento de longitud de onda este acoplador tuvo una máxima sensibilidad de 2350 nm/RIU. Estos resultados se pueden

considerar dentro de los mejores publicados en el desarrollo de sensores de IR basados en acopladores de fibra óptica.

5.2. Trabajo futuro

Hemos mencionado a través de este trabajo de tesis el uso de los acopladores bicónicos de fibra óptica para la medición de cambios de IR en soluciones acuosas, sin embargo, debido a que los acopladores poseen un campo evanescente muy fuerte y confinado en la región de la cintura, se mantiene el gran interés en utilizar esta propiedad para expandir la investigación en materia de sensores biológicos. Aunque no es un tema nuevo, el sensado con acopladores ha atraído la atención en años recientes sobre todo en aplicaciones de bio-sensores con el objetivo de analizar bio-partículas en soluciones como ADN (ácido desoxirribonucleico), proteínas, bacterias, etc. En este tipo de experimentos existe la opción de realizar un tratamiento previo sobre las fibras para provocar cierta adsorción de las moléculas a sensar, pero también el uso de los acopladores nos ofrece la ventaja de experimentar sin tratamiento alguno sobre las fibras. En la Fig. 6.1 a) se muestra el principio básico de funcionamiento para este caso, donde los anticuerpos se adhieren a la superficie del acoplador por adsorción física. Si el anticuerpo reconoce un antígeno específico ocurre una unión entre el anticuerpo y el antígeno, este fenómeno incrementa el IR en la superficie del acoplador provocando un desplazamiento en la longitud de onda, entonces dependiendo de este desplazamiento podemos determinar el tipo de antígeno que está detectando el dispositivo.

Si se busca experimentar en el área de bio-sensores y nos basamos en las configuraciones de sensado presentadas en esta tesis, el primer objetivo sería operar al acoplador en los ciclos finales de acoplamiento, donde su diámetro es cercano a $1 \mu\text{m}$, como se observa en el recuadro azul de la firma de estiramiento del acoplador en la Fig 5.1 b). Si se logra trabajar con diámetros de esta magnitud será posible fabricar bio-sensores con límites de detección en el régimen de

respuesta espectral superiores a 10^{-6} RIU, lo que representa un buen desempeño en el área de sensado basado en acopladores bicónicos.

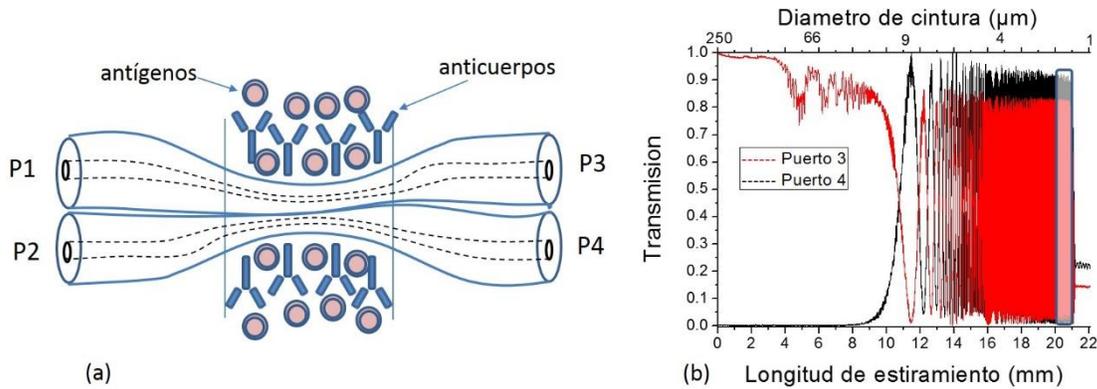


Fig. 5.1. a) Esquema de un bio-sensor basado en el acoplador bicónico donde los anticuerpos se adhieren al acoplador por adsorción física. b) Firma de estiramiento típica de un acoplador, se sugiere trabajar en la zona de acoplamiento marcada en el recuadro azul para incrementar la sensibilidad.

Otro ejemplo de las líneas de investigación que resulta atractivo para los acopladores bicónicos es el sensado de hidrogeno, ya que es un material altamente flamable y explosivo. Dentro de los campos más importantes para sensar hidrogeno es en celdas combustibles de automóviles y en aplicaciones aeroespaciales. Como hemos mencionado, las ventajas de usar los acopladores bicónicos es que poseen inmunidad a los campos electromagnéticos, además la zona de sensado que comprende las transiciones y la cintura del acoplador, puede fabricarse desde 1.5 mm hasta varios cm de largo. Para poder sensar hidrogeno, el acoplador recibe un tratamiento previo, depositando sobre la zona de la cintura una fina capa de paladio de unos cuantos nm de espesor, ver Fig. 5.2. Cuando las moléculas de hidrogeno circulan sobre el acoplador estas se difunden sobre la superficie del paladio convirtiéndolo en hidruro de paladio. Este fenómeno causa un cambio en la parte real e imaginaria del IR del paladio, la cual es percibida como una atenuación de las ondas evanescentes propagándose en el acoplador. Trabajando en régimen de transmisión de potencia, lo que podremos observar es un decaimiento en la potencia transmitida en función del incremento de las moléculas de hidrogeno circulando sobre el acoplador.

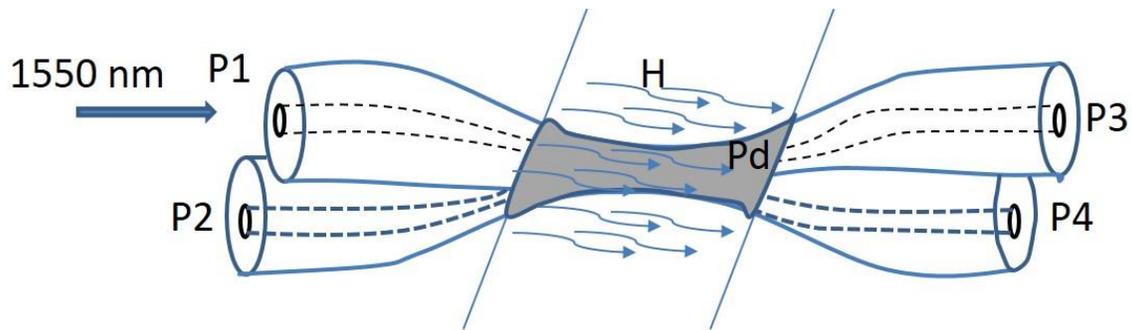


Fig. 5.2. Esquema del acoplador bicónico recubierto con una capa de paladio para el sentido de hidrogeno.

Finalmente, hemos propuesto el funcionamiento de un sistema de sentido basado en acopladores bicónicos de fibra óptica que puede trabajar en el régimen de transmisión de potencia y en el régimen de respuesta espectral. En ambos regímenes implica modificar el IR que rodea al acoplador y que interactúa directamente con las ondas evanescentes que se propagan. Al ser una estructura con una cintura muy delgada donde el campo evanescente propagándose es muy fuerte, hace que los acopladores sean dispositivos muy sensibles y sigan manteniéndose vigentes en esquemas de sentido.

