

Microcavidades ópticas cilíndricas



Miguel V. Andrés





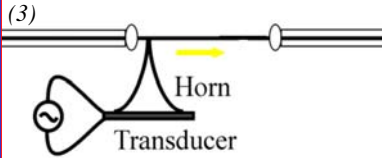

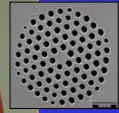

Laboratorio de Fibras Ópticas de la Universidad de Valencia


Departamento de Física Aplicada – ICMUV

miguel.andres@uv.es




**Fiber-optics components technologies**

- **Fabrication of fiber-optics components**
 - Optical fiber tapers: fusion & pulling technique
 - (1) 

 - Fiber Bragg gratings and LPG
 - (2) 

 - In-Fiber acousto-optic devices
 - (3) 
 - Microstructured optical fiber
 - (4) 


- **Applications:**
 - All-fiber light sources
 - Optical communications and microwave photonics
 - Optical fiber sensors



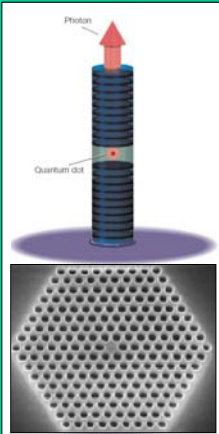
UNIVERSITAT DE VALÈNCIA

Microcavidades ópticas

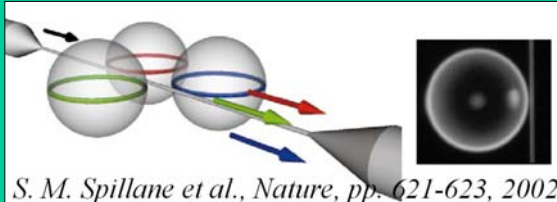


Microcavidades tipo Fabry-Perot y de cristal fotónico

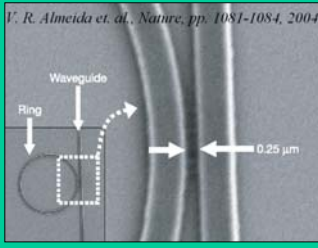
Microcavidades basadas en resonancias de ondas superficiales (Whispering Gallery Modes, WGM)



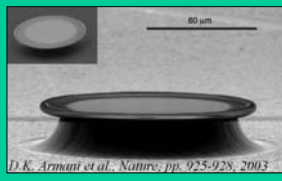
K. J. Vahala, Nature, pp. 839-846, 2003




S. M. Spillane et al., Nature, pp. 621-623, 2002



V. R. Almeida et al., Nature, pp. 1081-1084, 2004




D. K. Armani et al., Nature, pp. 925-928, 2003



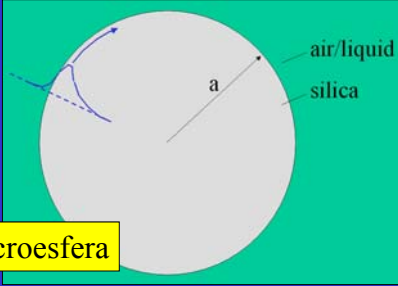
UNIVERSITAT DE VALÈNCIA

Objetivo

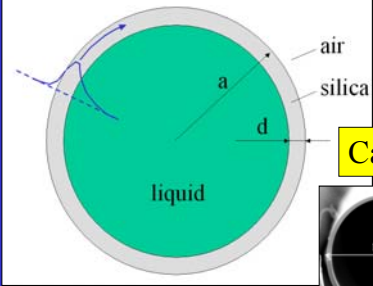


Laboratorio de Fibras Ópticas

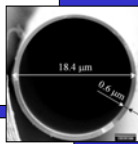
- Ondas superficiales: microcilindros / capilares delgados



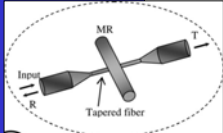
Microesfera

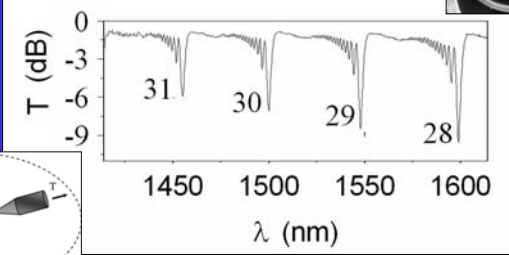


Capilar



- Fabricación de capilares delgados de pared submicrométrica para aplicaciones de sensor químico
- Las microcavidades cilíndricas pueden sintonizarse empleando diversas técnicas





Microcavidades Ópticas cilíndricas

I. Fundamentos y propiedades básicas

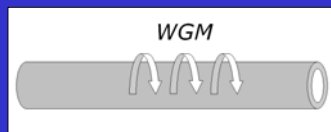
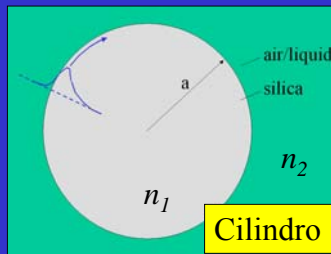
- I.1. Teoría
- I.2. Fabricación
- I.3. Propiedades básicas

II. Desarrollos recientes

- II.1. Reflexión de una microcavidad
- II.2. Excitación con puntas de fibra óptica
- II.3. Láser de una sola frecuencia sintonizable
- II.4. Microrresonador sintonizable con control óptico

III. Conclusiones

- Ecuaciones de Maxwell + condiciones de contorno
- Ondas propagándose en la dirección azimutal, con componente axial del vector \mathbf{k} nula ($k_z = 0$)
- El espectro de estas resonancias se desdobra en las series TM^z y TE^z



Modos TM^z , medio 1 ($\rho < a$)

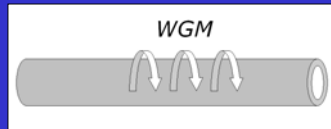
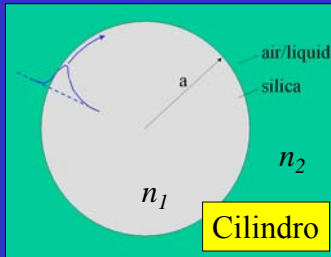
$$E_{z1} = A_1 J_m(k_1 \rho) e^{-jm\phi} e^{j\omega t}$$

$$E_{\rho 1} = E_{\phi 1} = H_{z1} = 0$$

$$H_{\rho 1} = \frac{A_1 m}{\omega \rho} J_m(k_1 \rho) e^{-jm\phi} e^{j\omega t}$$

$$H_{\phi 1} = -\frac{A_1 k_1}{j\omega \mu_0} J'_m(k_1 \rho) e^{-jm\phi} e^{j\omega t}$$

- Ecuaciones de Maxwell + condiciones de contorno
- Ondas propagándose en la dirección azimutal, con componente axial del vector \mathbf{k} nula ($k_z = 0$)
- El espectro de estas resonancias se desdobra en las series TM^z y TE^z



Modos TM^z , medio 2 ($\rho > a$)

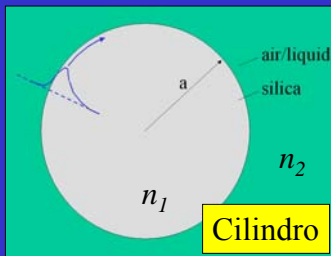
$$E_{z2} = B_1 H_m^{(2)}(k_2 \rho) e^{-jm\phi} e^{j\omega t}$$

$$E_{\rho 2} = E_{\phi 2} = H_{z2} = 0$$

$$H_{\rho 2} = \frac{B_1 m}{\omega \rho} H_m^{(2)}(k_2 \rho) e^{-jm\phi} e^{j\omega t}$$

$$H_{\phi 2} = -\frac{B_1 k_2}{j\omega \mu_0} H_m^{(2)'}(k_2 \rho) e^{-jm\phi} e^{j\omega t}$$

- Ecuaciones de Maxwell + condiciones de contorno
- Ondas propagándose en la dirección azimutal, con componente axial del vector \mathbf{k} nula ($k_z = 0$)
- El espectro de estas resonancias se desdobra en las series TM^z y TE^z



$$2\pi a n_1 \approx m\lambda$$

La condición de resonancia $\rightarrow \beta_\phi = m$

Modos TM^z
$$n_1 \frac{J_m'(k_1 a)}{J_m(k_1 a)} = n_2 \frac{H_m^{(2)'}(k_2 a)}{H_m^{(2)}(k_2 a)}$$

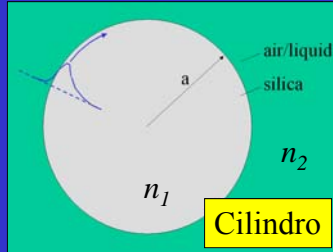
Modos TE^z
$$\frac{1}{n_1} \frac{J_m'(k_1 a)}{J_m(k_1 a)} = \frac{1}{n_2} \frac{H_m^{(2)'}(k_2 a)}{H_m^{(2)}(k_2 a)}$$

No hay solución con variable real

$$\omega = \omega' + j\omega'' \Rightarrow e^{j\omega t} = e^{j\omega' t} \cdot e^{-\omega'' t}$$

\Rightarrow Las resonancias radían energía

• Ecuaciones de Maxwell + condiciones de contorno

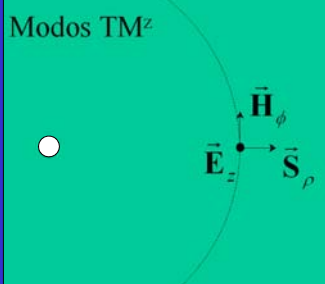


Factor de calidad de la resonancia Q :

$$Q = \omega \frac{U_T}{P_p} \Rightarrow Q = \frac{1}{2} \left(\frac{\omega'}{\omega''} \right)$$

$$\omega = \omega' + j\omega''$$

Modos TM^z



$$E_{z2} = B_1 H_m^{(2)}(k_2 \rho) e^{-jm\phi} e^{j\omega t}$$

$$H_{\phi 2} = -\frac{B_1 n_2}{jz_0} H_m^{(2)'}(k_2 \rho) e^{-jm\phi} e^{j\omega t} \Rightarrow$$

$$\vec{S}_{2\rho} = |B_1|^2 \frac{2}{\pi k_0 z_0 \rho} \vec{u}_\rho \quad \frac{P_p}{L} = |B_1|^2 \frac{4}{z_0 k_0}$$

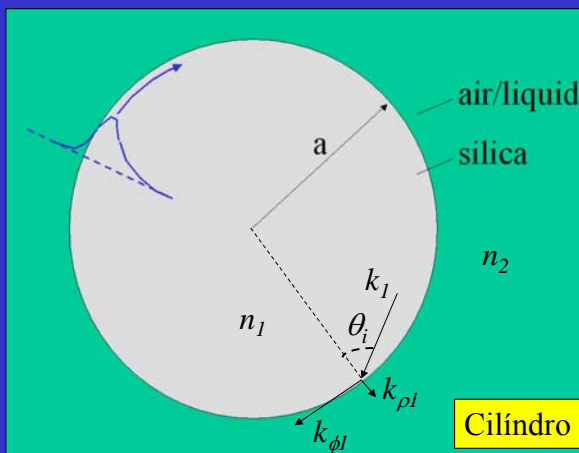
• Ecuaciones de Maxwell + condiciones de contorno

Modos TM^z

$$n_1 \frac{J_m'(k_1 a)}{J_m(k_1 a)} = n_2 \frac{H_m^{(2)'}(k_2 a)}{H_m^{(2)}(k_2 a)}$$

Modos TE^z

$$\frac{1}{n_1} \frac{J_m'(k_1 a)}{J_m(k_1 a)} = \frac{1}{n_2} \frac{H_m^{(2)'}(k_2 a)}{H_m^{(2)}(k_2 a)}$$



$$1) k_1 > k_{\phi 1} \rightarrow k_1 a > m$$

$$2) \theta_i > \theta_c \rightarrow m > k_2 a$$

Para una frecuencia ω dada:

$$k_1 a > m > k_2 a$$

Para un orden m dado:

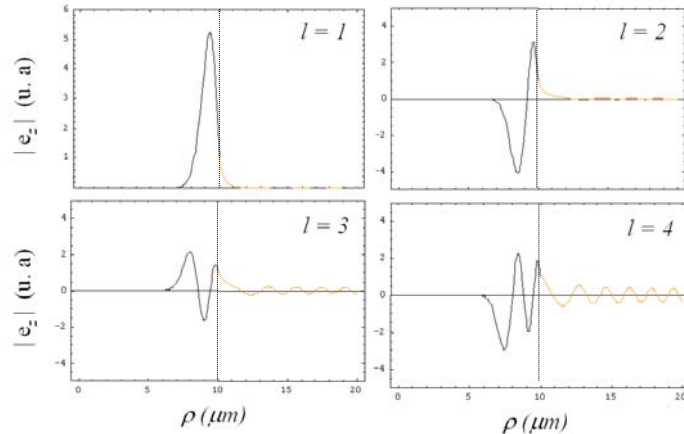
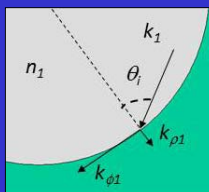
$$\frac{m}{n_2} > k_0 a > \frac{m}{n_1}$$

- Órdenes radiales y método perturbativo
 - Resonancias con pocas pérdidas: $\omega' \gg \omega''$
 - Campos en el exterior, junto a la interfase:

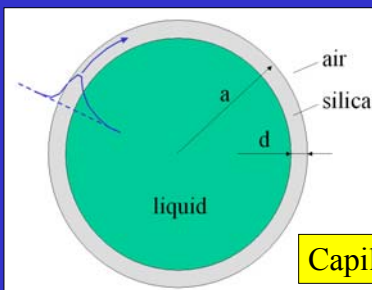
$$H_m^{(2)}(z_2) = J_m(z_2) + j Y_m(z_2) \rightarrow |Y_m(z_2)| \gg |J_m(z_2)|$$

Modos TM^z:

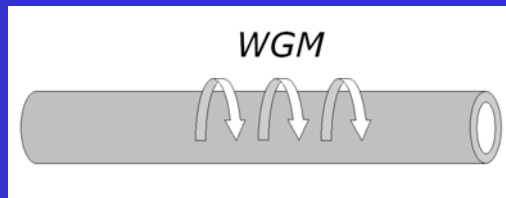
- orden azimutal $m = 51$,
- ordenes radiales $l = 1 - 4$,
- Parámetros:
 $a = 10 \mu\text{m}$,
 $n_1 = 1.5$ y $n_2 = 1$



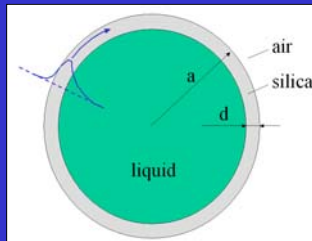
- Para el caso de capilares, el procedimiento es semejante:
 - Ecuaciones de Maxwell + condiciones de contorno
 - Ondas propagándose en la dirección azimutal, con componente axial del vector \mathbf{k} nula ($k_z = 0$)
 - El espectro de estas resonancias se desdobra en las series TM^z y TE^z



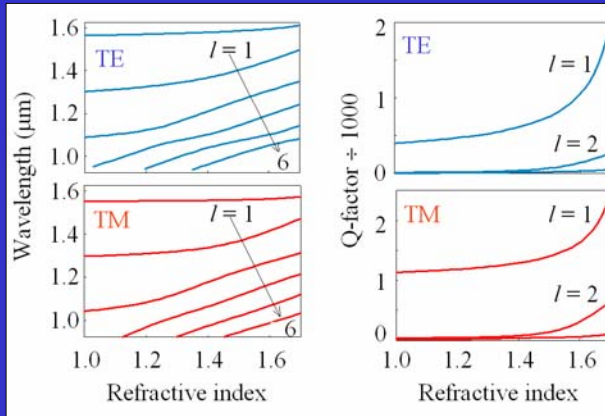
Capilares



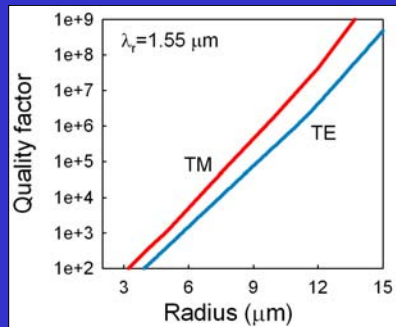
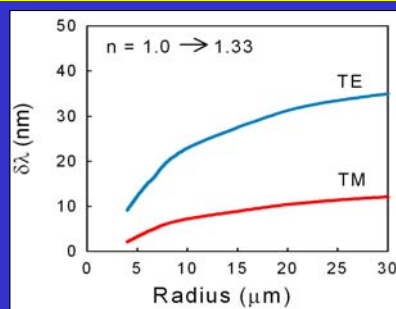
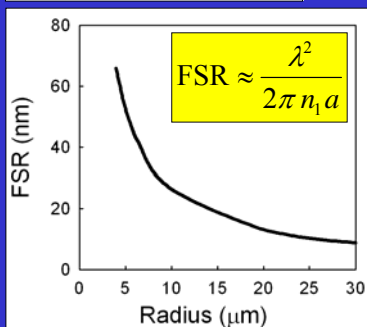
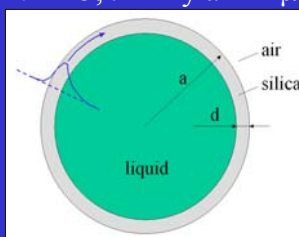
- Modos de orden azimutal $m = 25$ y orden radial l , para un capilar de radio $a = 5 \mu\text{m}$ y grosor $d = 1 \mu\text{m}$



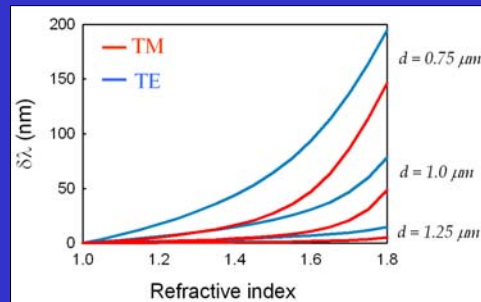
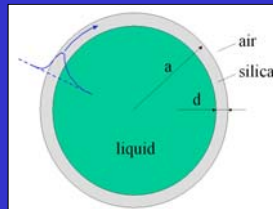
- TE^z: $E_z = 0$
- TM^z: $H_z = 0$
- El orden azimutal es:
 $m \approx (2\pi a n) \div \lambda$



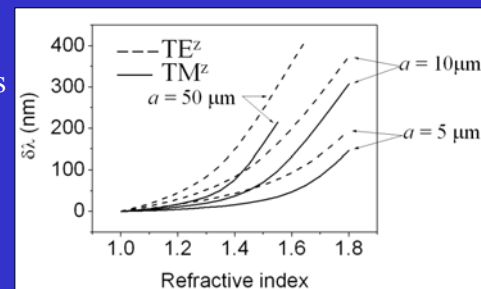
- Modos de orden azimutal $m = 25$, $l = 1$ y $d = 1 \mu\text{m}$



- Modos de orden azimutal $m = 25, l = 1$ y $a = 5 \mu\text{m}$



- Modos ($l = 1$) centrados en 1550 nm para diferentes radios a (μm) y grosor $d = 0.75 \mu\text{m}$



Microcavidades Ópticas cilíndricas

I. Fundamentos y propiedades básicas

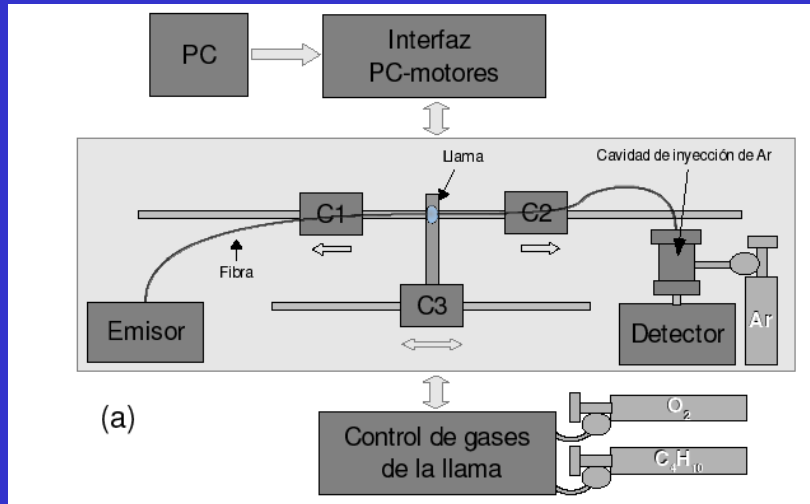
- I.1. Teoría
- I.2. Fabricación
- I.3. Propiedades básicas

II. Desarrollos recientes

- II.1. Reflexión de una microcavidad
- II.2. Excitación con puntas de fibra óptica
- II.3. Láser de una sola frecuencia sintonizable
- II.4. Microrresonador sintonizable con control óptico

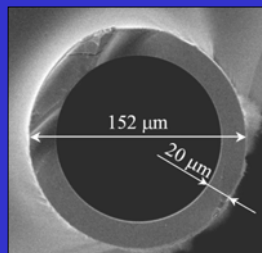
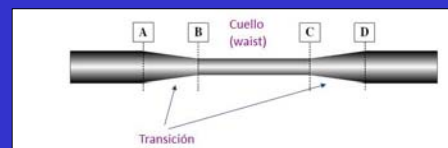
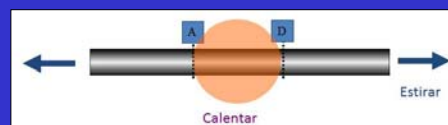
III. Conclusiones

- Equipo de estrechar fibras por fusión y estiramiento (*fiber tapers*)

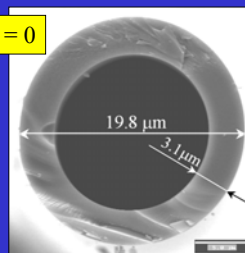


- Equipo de estrechar fibras por fusión y estiramiento (*fiber tapers*)

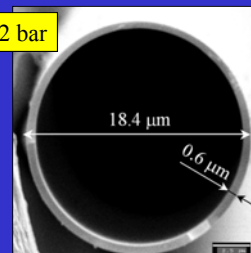
- A partir de tubos comerciales de sílice Suprasil-300 de ~ 1 cm de diámetro, se preparan capilares de ~ 100 μm de diámetro y grosor ~ 20 μm , empleando una torre de estirado de fibra óptica
- El diámetro se reduce a su valor final mediante fusión y estiramiento local
- La reducción del grosor de la pared hasta valores submicrométricos se consigue presurizando los capilares



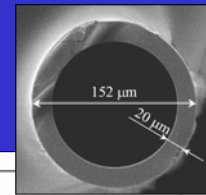
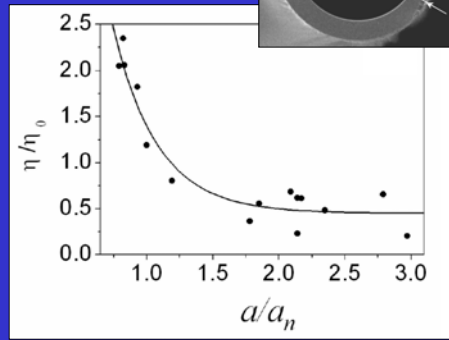
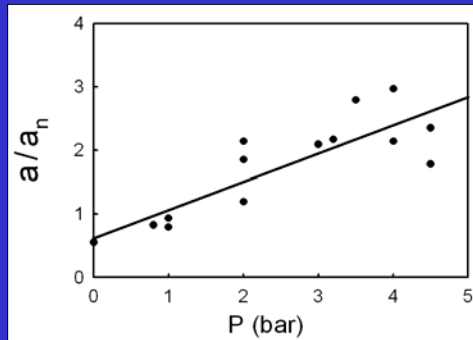
P = 0



P = 2 bar



- Una presión de 2 bar permite inflar los capilares y obtener una reducción de la ratio grosor/diámetro de hasta un factor 0.5

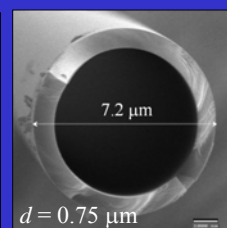
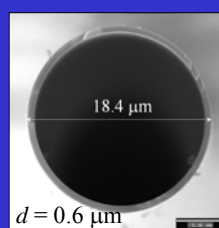
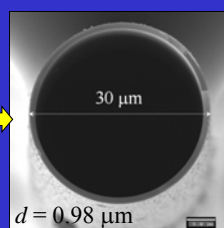
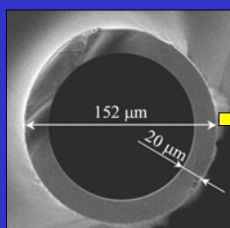


a: radio de un capilar estrechado
a_n: radio de un cilindro macizo estrechado

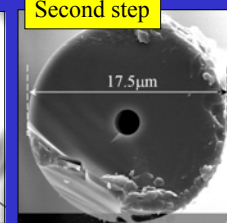
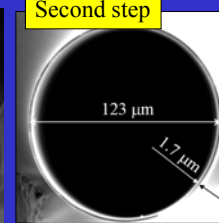
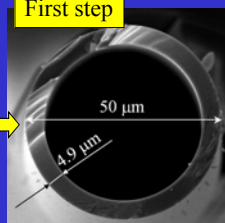
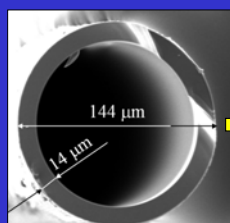
η: ratio grosor / diámetro
η₀: ratio antes de procesar (0.26)

Opt. Express., pp. 12011-16, 2007

- Ejemplos: serie de capilares de pared submicrométrica: proceso simple de un sólo paso



- Proceso nuevo de dos pasos para conseguir capilares de mayor diámetro



Microcavidades Ópticas cilíndricas

I. Fundamentos y propiedades básicas

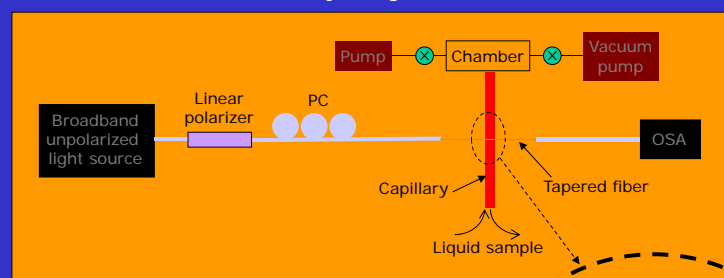
- I.1. Teoría
- I.2. Fabricación
- I.3. Propiedades básicas

II. Desarrollos recientes

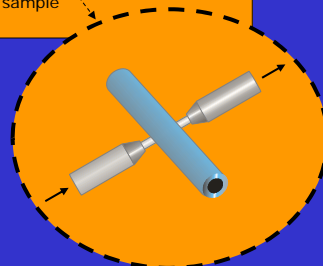
- II.1. Reflexión de una microcavidad
- II.2. Excitación con puntas de fibra óptica
- II.3. Láser de una sola frecuencia sintonizable
- II.4. Microrresonador sintonizable con control óptico

III. Conclusiones

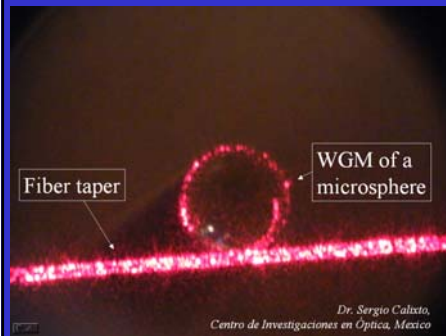
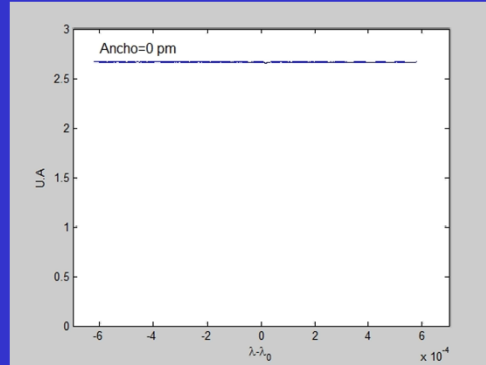
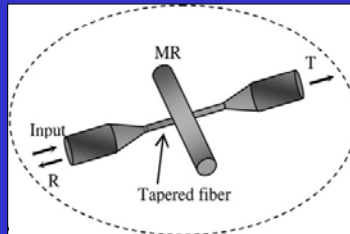
• Montaje experimental



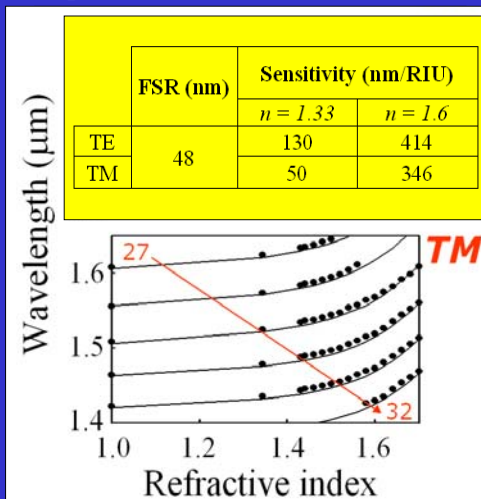
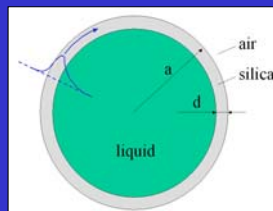
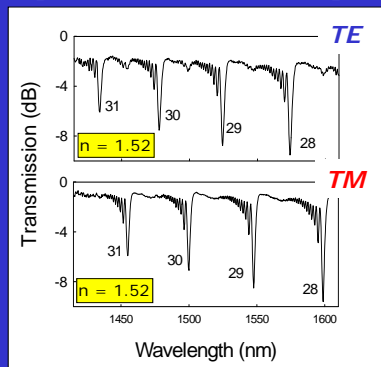
- Excitación de las resonancias con una fibra estrechada ($1\ \mu\text{m}$)
- Cada resonancia produce un pico de atenuación en el espectro de transmitancia
- La polarización de la luz incidente se ajusta con un polarizador y un controlador de polarización (PC)
- Los líquidos se intercambian con la ayuda de una bomba de vacío y aire a presión



• Excitación de una resonancia



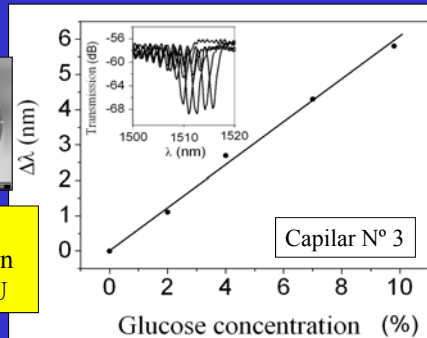
• Espectros de transmisión para un capilar: $a = 5.5 \mu\text{m}$ y $d = 0.8 \mu\text{m}$



- Respuesta de diferentes capilares como sensor de glucosa



El factor Q es bajo (~ 500), lo que acota el límite de detección a un valor entre 10^{-3} - 10^{-4} RIU



Capillary reference	Diameter (μm)	Wall thickness (μm)	Sensitivity (nm / %)	
			TE ^z	TM ^z
1	55.6	1.64	1.237*	1.228*
1	55.6	1.64	0.827	- - -
2	30.0	0.98	0.741	0.518
3	18.4	0.60	0.645	0.371
4	17.7	0.61	0.586	0.351
5	9.0	0.80	- - -	0.184

* Second radial order resonance ($l = 2$), 750 nm/RIU

Microcavidades Ópticas cilíndricas

I. Fundamentos y propiedades básicas

- I.1. Teoría
- I.2. Fabricación
- I.3. Propiedades básicas

II. Desarrollos recientes

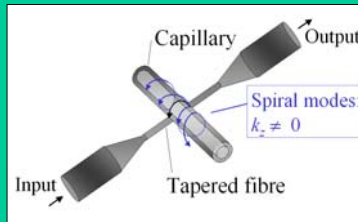
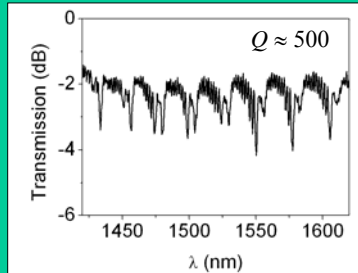


- II.1. Reflexión de una microcavidad
- II.2. Excitación con puntas de fibra óptica
- II.3. Láser de una sola frecuencia sintonizable
- II.4. Microrresonador sintonizable con control óptico

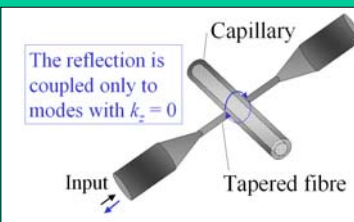
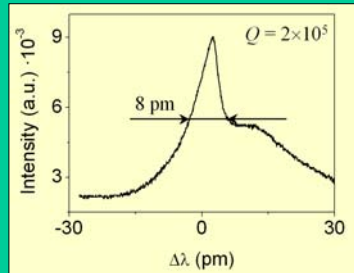
III. Conclusiones

- Espectros de reflexión: medida precisa de las resonancias

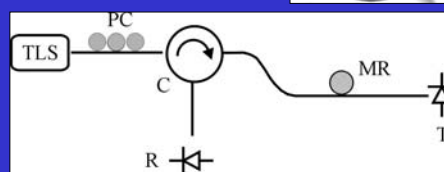
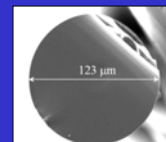
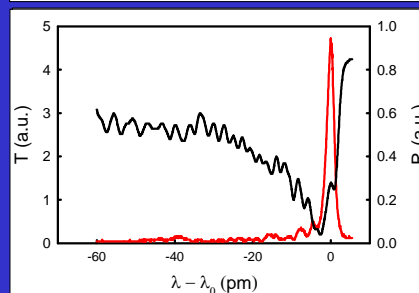
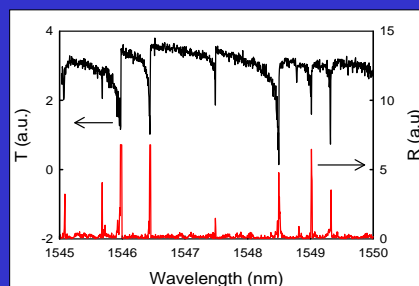
Espectro de transmisión
 $a = 10 \mu\text{m}$ y $d = 1 \mu\text{m}$



Espectro de reflexión:
 $a = 10 \mu\text{m}$ y $d = 1 \mu\text{m}$



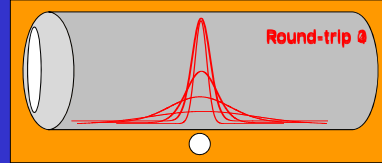
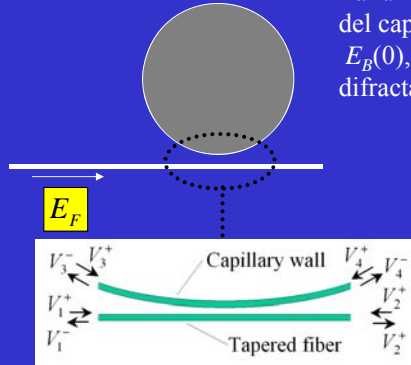
- Resonancias de un cilindro macizo



- Las resonancias en transmisión son asimétricas, mientras que las resonancias en reflexión son simétricas
- El pico de reflexión está desplazado respecto al mínimo de transmitancia hacia las longitudes de ondas largas
- El ancho espectral de los picos en reflexión es más de un orden de magnitud menor que la anchura de los picos en transmisión

• Resonancias de un cilindro macizo

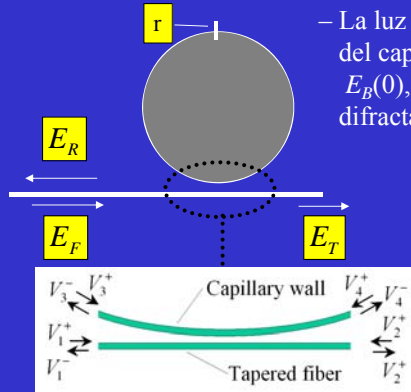
- La luz incidente excita toda una colección de modos del capilar, que definen la distribución de campo inicial, $E_B(0)$, que se propagará guiada por la interfase y difractándose a lo largo del eje del cilindro



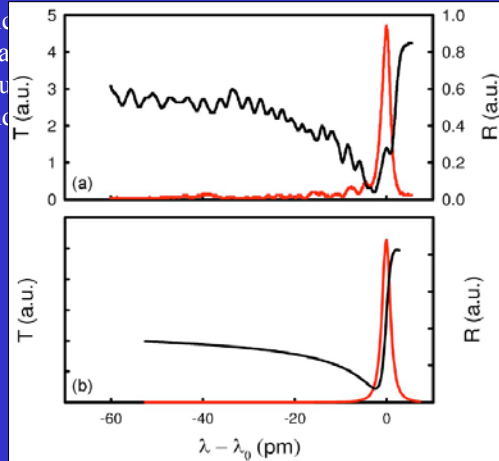
$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & \alpha & 0 & j\beta \\ \alpha & 0 & j\beta & 0 \\ 0 & j\beta & 0 & \alpha \\ j\beta & 0 & \alpha & 0 \end{bmatrix} \quad \alpha = \sqrt{1 - \beta^2}$$

• Resonancias de un cilindro macizo

- La luz incidente excita toda una colección de modos del capilar, que definen la distribución de campo inicial, $E_B(0)$, que se propagará guiada por la interfase y difractándose a lo largo del eje del cilindro

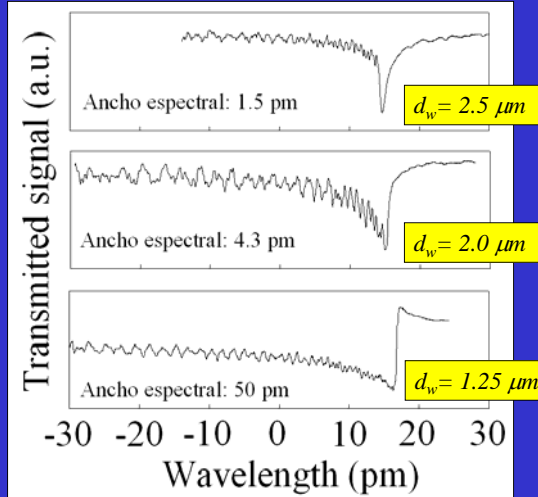
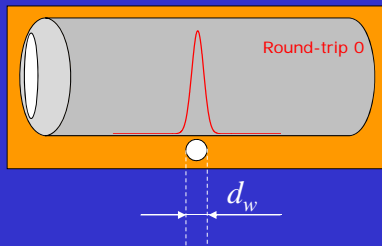
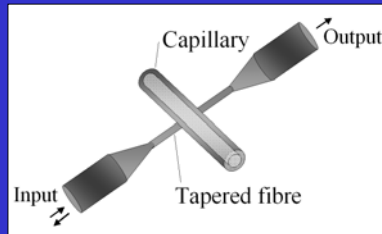


$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & \alpha & 0 & j\beta \\ \alpha & 0 & j\beta & 0 \\ 0 & j\beta & 0 & \alpha \\ j\beta & 0 & \alpha & 0 \end{bmatrix} \quad \alpha = \sqrt{1 - \beta^2}$$



- Modelo sencillo: E_F y $E_B(nl)$ los tomamos como haces Gaussianos y Gaussianos elípticos ($\alpha = 0.9995$, $f = 0.999$, $\omega_0 = 1.0 \mu\text{m}$ y $r = 0.001$)

• Resonancias de un cilindro macizo



Opt. Lett., pp. 1039-1041, 2009
Photonics Nanostruct. Fundam. Appl., pp. 149-158, 2011

Microcavidades Ópticas cilíndricas

I. Fundamentos y propiedades básicas

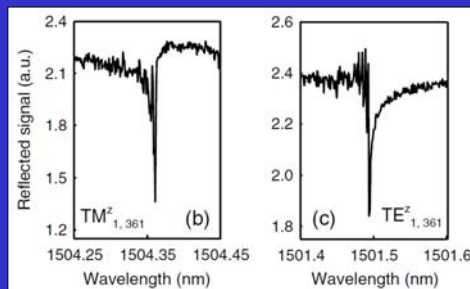
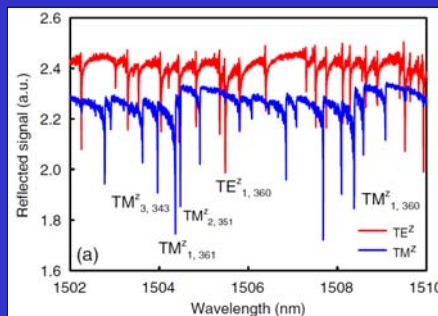
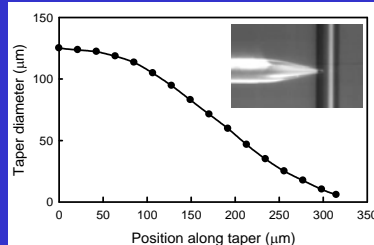
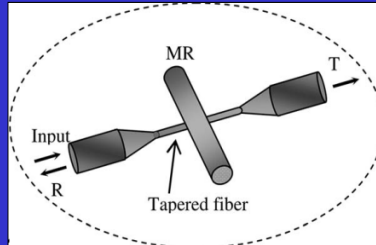
- I.1. Teoría
- I.2. Fabricación
- I.3. Propiedades básicas

II. Desarrollos recientes

- II.1. Reflexión de una microcavidad
- II.2. Excitación con puntas de fibra óptica
- II.3. Láser de una sola frecuencia sintonizable
- II.4. Microrresonador sintonizable con control óptico

III. Conclusiones

- Excitación de los microrresonadores con puntas de fibra óptica



Opt. Lett., pp. 3452-3454, 2011

Microcavidades Ópticas cilíndricas

I. Fundamentos y propiedades básicas

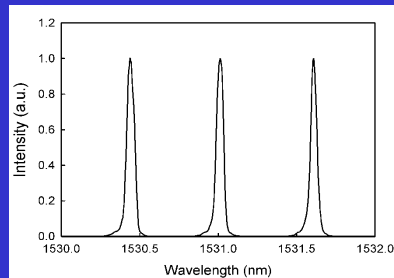
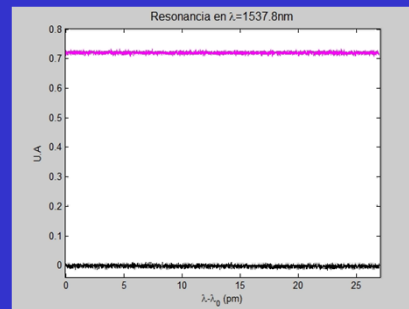
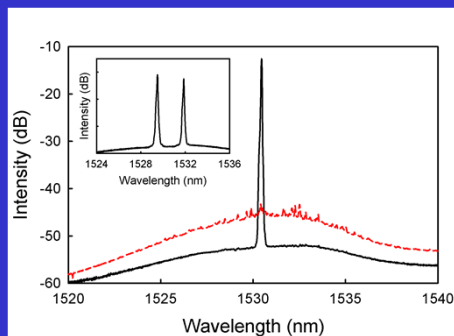
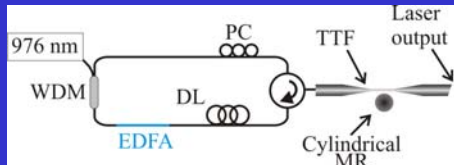
- I.1. Teoría
- I.2. Fabricación
- I.3. Propiedades básicas

II. Desarrollos recientes

- II.1. Reflexión de una microcavidad
- II.2. Excitación con puntas de fibra óptica
- II.3. Láser de una sola frecuencia sintonizable
- II.4. Microrresonador sintonizable con control óptico

III. Conclusiones

- Láser sintonizable de una sola frecuencia con un microrresonador cilíndrico ligeramente ahusado



Opt. Lett., pp. 1636-1638, 2013

Microcavidades Ópticas cilíndricas

I. Fundamentos y propiedades básicas

- I.1. Teoría
- I.2. Fabricación
- I.3. Propiedades básicas

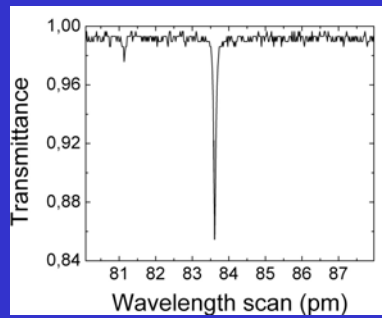
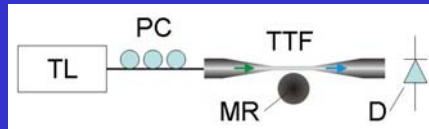
II. Desarrollos recientes

- II.1. Reflexión de una microcavidad
- II.2. Excitación con puntas de fibra óptica
- II.3. Láser de una sola frecuencia sintonizable
- II.4. Microrresonador sintonizable con control óptico

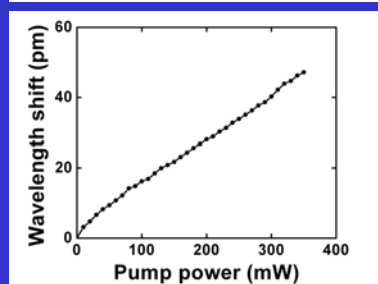
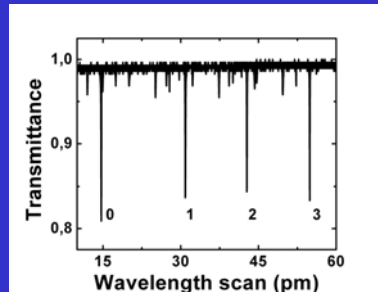


III. Conclusiones

• Microrresonador de sílice dopado con erbio



- Resonancia centrada en 1530 nm con un ancho de línea de 0.068 pm ($Q=2.2 \times 10^7$)
- 10 pm/°C → sensor de temperatura con resolución de 3×10^{-3} °C



Microcavidades Ópticas cilíndricas

I. Fundamentos y propiedades básicas

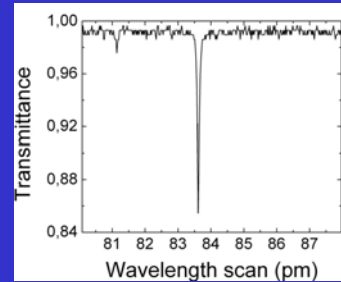
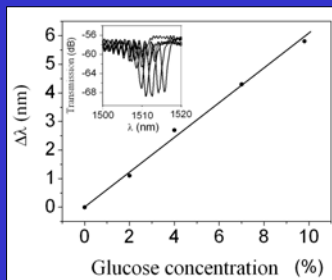
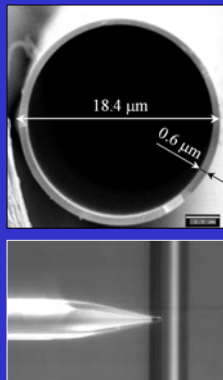
- I.1. Teoría
- I.2. Fabricación
- I.3. Propiedades básicas

II. Desarrollos recientes

- II.1. Reflexión de una microcavidad
- II.2. Excitación con puntas de fibra óptica
- II.3. Láser de una sola frecuencia sintonizable
- II.4. Microrresonador sintonizable con control óptico

➔ III. Conclusiones

- Las microcavidades ópticas cilíndricas pueden construirse fácilmente con fibras y capilares estrechados por fusión y estiramiento y se excitan con *microtapers* o puntas de fibra óptica
- Estas microcavidades alcanzan factores de calidad superiores a 10^7 y pueden sintonizarse de diferentes formas
- Aplicaciones: sensores de índice de refracción, filtros sintonizables, láseres de una sola frecuencia sintonizable



$$Q=2.2 \times 10^7$$