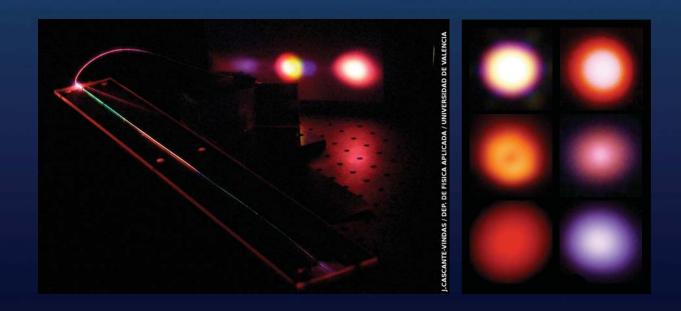


# Esquema de la presentación

- 1. Introducción
- 2. Generación de SC en fibras microestructuradas
- 3. Generación de SC en tapers microestructurados
- 4. Nuevos esquemas de generación
- 5. Conclusiones y proyectos futuros

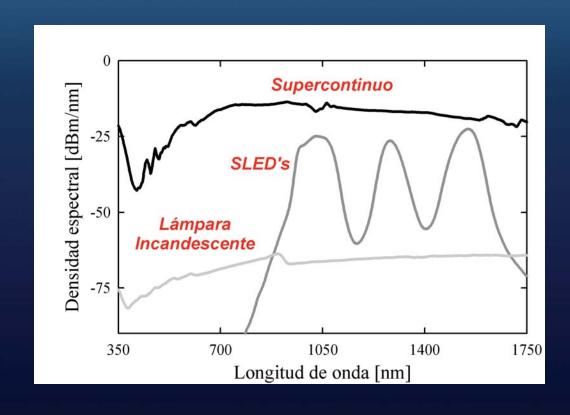
# ¿Qué es un Supercontinuo?

"Generación de pulsos de luz blanca, intensos, ultra rápidos y de gran ancho espectral, abarcando desde la zona ultravioleta hasta el infrarrojo cercano, los cuales son producidos por la interacción no lineal y propagación de pulsos ultra rápidos enfocados en un material transparente" "[1]



# ¿Por qué se investiga?

"Permite implementar fuentes de radiación intensas, de amplio espectro, coherentes, compactas, económicas y eficientes"



## Aplicaciones

Citometría de flujo Tomografía OCT Técnicas LIDAR Sistemas WDM Espectroscopía Fotoquímica Metrología

# ¿Qué se necesita para generarlo?



Continuo (CW)
Cuasicontinuo (> 10 ps)
Pulsos cortos (1-10 ps)
Pulsos ultra cortos (< 1 ps)

Materiales volumétricos Fibras ópticas Fibras microestructuradas Dispositivos de fibra estrechada

# ¿Por qué un láser cuasicontinuo?

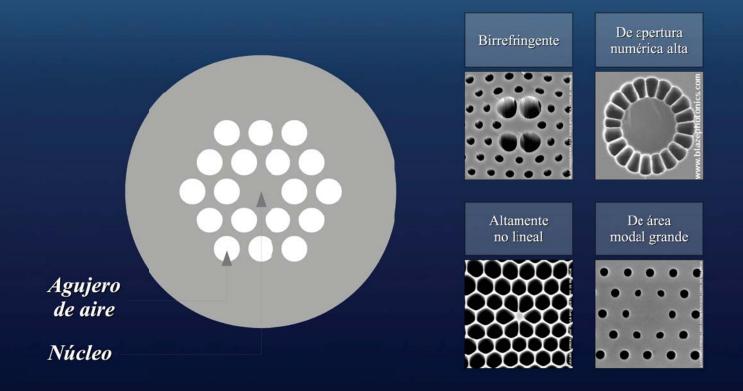
## Principalmente por tres razones:

- 1. Láseres microchip Nd:glass: compactos, robustos y baratos.
- 2. Láseres de fibra Q-switch: facilitan la inyección, mucho más compactos y baratos que los basados en moduladores mode-locked.
- 3. Espectros de SC amplios, planos y estables, obtenidos con valores relativamente bajos de potencia de bombeo.

#### 1. Introducción

# ¿Qué es una fibra microestructurada (MSF)?

"Guía de onda compuesta generalmente por un único núcleo rodeado por una estructura ordenada de agujeros de aire, los cuales se extienden a lo largo de la guía y que confinan los campos entorno al núcleo"



# ¿Por qué fibra microestructurada?

### Presentan las ventajas de las fibras ópticas convencionales:

<u>Núcleo pequeño</u>: incrementa la densidad de energía y el coeficiente no lineal (al reducir el área efectiva).

Longitud larga: mejora las interacciones no lineales.

### Además:

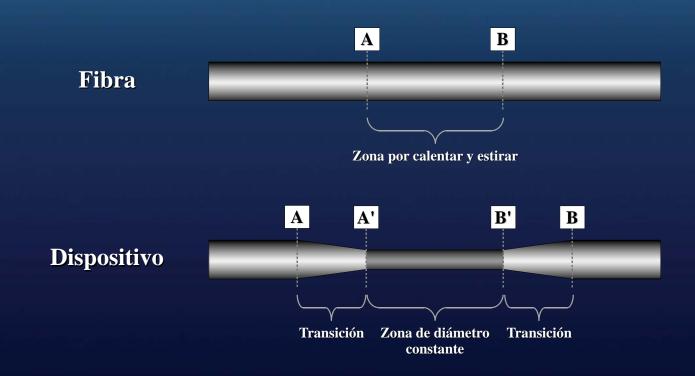
Mayor diferencia de índice efectivo entre el núcleo y la cubierta: mejora el confinamiento de la energía.

<u>Diseño más flexible</u>: permite ajustar la dispersión con mayor flexibilidad e incorporar dopantes en el núcleo de manera sencilla.

#### 1. Introducción

## ¿Qué es un dispositivo de fibra estrechada (taper)?

"Dispositivo obtenido al calentar y estirar una sección de fibra. La estructura final presenta una región de diámetro constante y reducido, y dos zonas transitorias, anterior y posterior a la región de diámetro constante"



# ¿Por qué tapers microestructurados?

Presentan las ventajas de los tapers de fibras ópticas convencionales:

<u>Área de interacción menor</u>: incrementa la densidad de energía y el coeficiente no lineal sin perjudicar la inyección del haz de bombeo.

La técnica permite modificar la dispersión: la ZDW se ajusta fácilmente a las condiciones experimentales.

#### Además:

<u>Tiene una cubierta</u>: protege al núcleo contra las perturbaciones exteriores y aumenta su resistencia mecánica (permite dispositivos más largos).

#### 1. Introducción

## ¿Qué efectos no lineales son predominantes?

<u>Inelásticos</u>: <u>dispersión Raman estimulada (SRS)</u> y dispersión Brillouin estimulada (SBS)

<u>Elásticos</u>: automodulación de fase (SPM), modulación de fase cruzada (XPM), generación de segunda armónica (SHG), suma y resta de frecuencias (SFG/SFG), generación de tercera armónica (THG) y mezcla de cuatro ondas (FWM/MI)

<u>Solitones y su dinámica</u>: fisión de solitones de orden superior, desplazamiento en frecuencia de solitones fundamentales (SSFS) y formación de ondas dispersivas (DW)

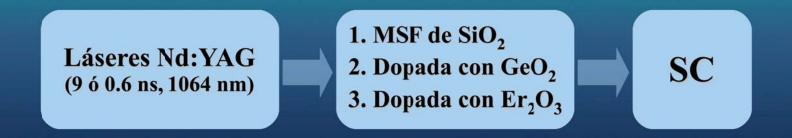
#### Generados por el bombeo cuasicontinuo

Generados por los efectos no lineales derivados del bombeo Poco relevantes

# Esquema de la presentación

- 1. Introducción
- 2. Generación de SC en fibras microestructuradas
- 3. Generación de SC en tapers microestructurados
- 4. Nuevos esquemas de generación
- 5. Conclusiones y proyectos futuros

# Experimentos efectuados

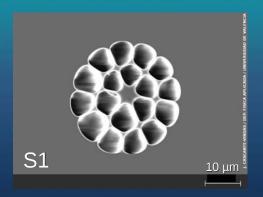


### Dinámica del ensanchamiento

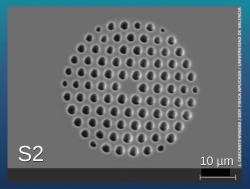
- En función de la potencia de bombeo.
- > Según la dispersión del medio.
- > De acuerdo con la polarización del bombeo.
- > Al agregar estos dopantes en el núcleo de las fibras.

# MSF de SiO<sub>2</sub>

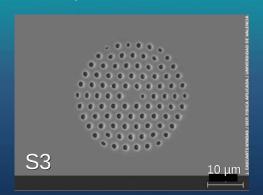
 $D_n = 4.7 \ \mu m \quad d/\Lambda = 0.94$   $\gamma = 25 \ W^{\text{-}1} \ km^{\text{-}1}$ 

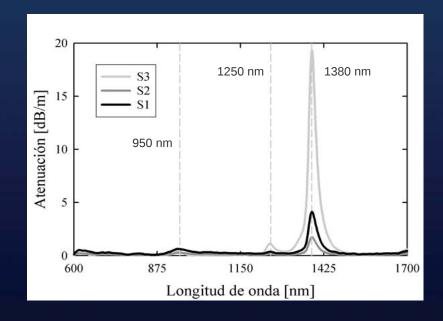


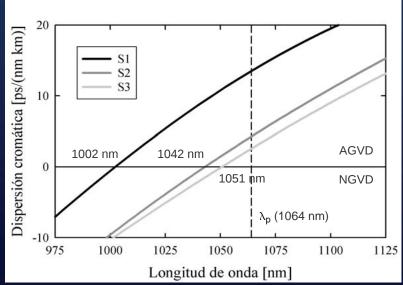
 $D_n = 5.2 \ \mu m \ d/\Lambda = 0.67$  $\gamma = 20 \ W^{-1} \ km^{-1}$ 



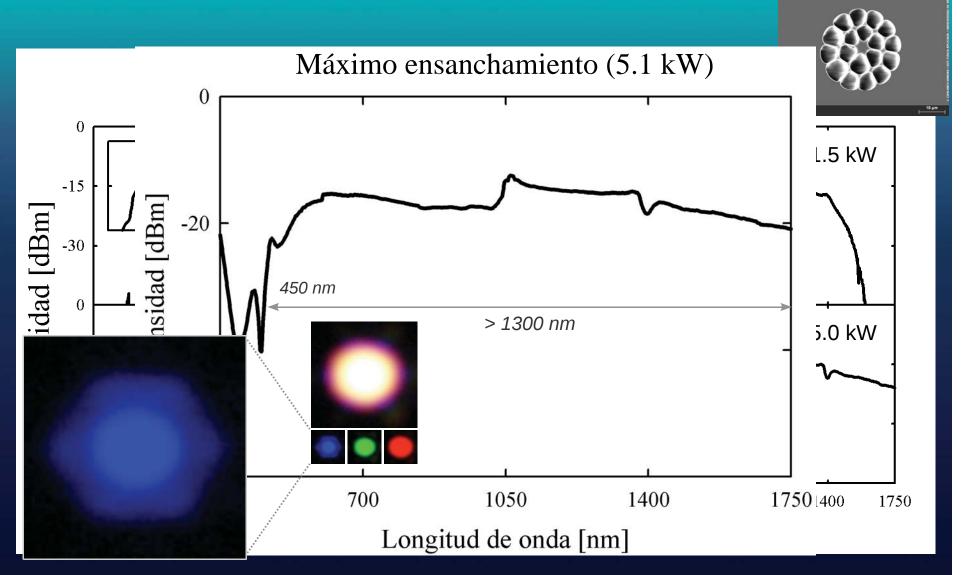
 $D_n = 4.9 \ \mu m \ d/\Lambda = 0.46$   $\gamma = 20 \ W^{-1} \ km^{-1}$ 







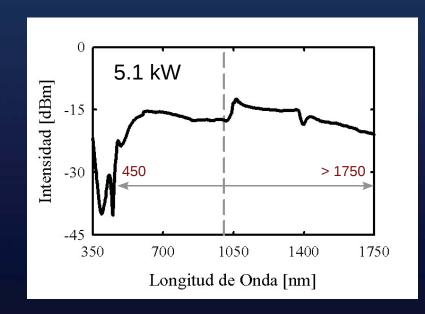
## SCG en S1 en función de la potencia de bombeo

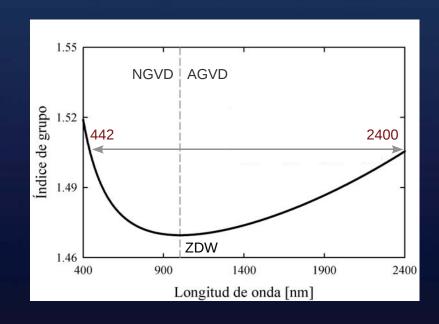


## SCG en S1 en función de la potencia de bombeo

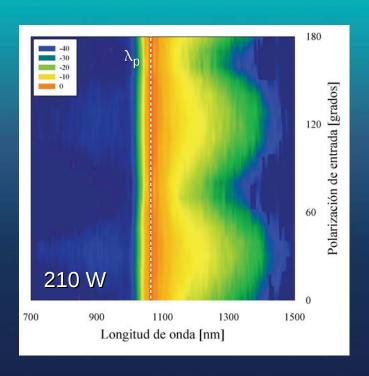
#### Dinámica del ensanchamiento:

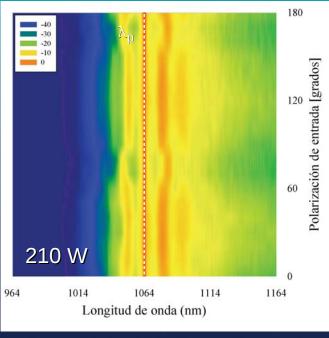
- 1. Generación de mezcla de cuatro ondas (FWM/MI).
- 2. Rompimiento de la MI en solitones de orden superior.
- 3. Fisión de solitones de orden superior en fundamentales.
- 4. Desplazamiento en frecuencia de solitones fundamentales (SSFS).
- 5. Formación de ondas dispersivas (DW).
- 6. El proceso SSFS/DW se detiene.





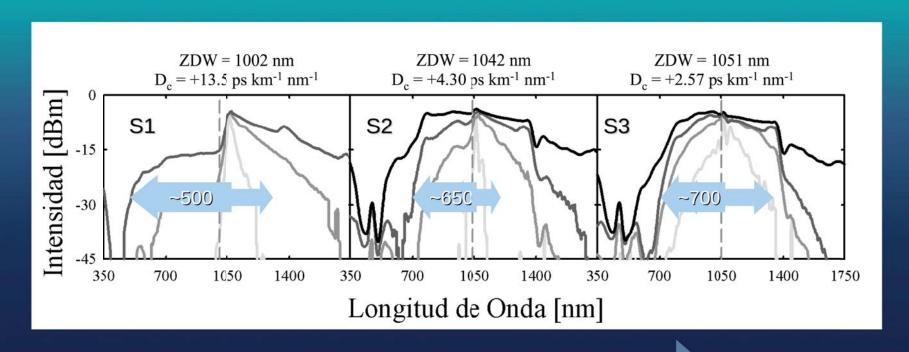
## SCG en S1 en función de la polarización del bombeo





- 1. El Binnefningenciasuestadosudeipolarizaçión no degenerados eje de polarización del haz de entrada.
- 2. La intensidad y la ubicación de las bandas FWM también cambian al modificar la polarización Determinan la posición de las bandas FWM
- 3. Las dos características presentan un comportamiento periódico.
- 4. Los ensanchamientos máximos/mínt/nos están en relación directa con la separación mínima/máxi**De finlesdimámiEdVinicial**

## SCG en función de la dispersión de la fibra



$$ZDW \rightarrow \lambda_n \implies Dispersión \rightarrow 0$$

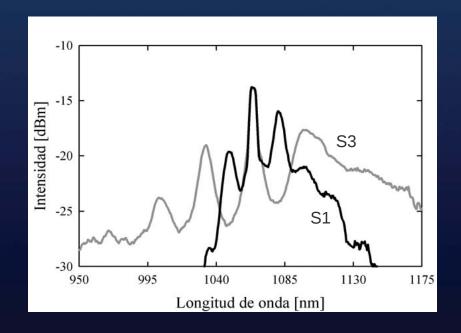
- 1. Para valores bajos de potencia, el ensanchamiento se vuelve más simétrico.
- 2. Para valores altos de potencia, el espectro se extiende hacia longitudes de onda más cortas a medida que la dispersión es mayor.

## SCG en función de la dispersión de la fibra

### ¿Porqué el ensanchamiento se vuelve más simétrico?

Cuando 
$$ZDW \rightarrow \lambda_p$$

- 1. El acoplamiento FWM-SRS se vuelve más fuerte  $\Rightarrow$  las componentes anti-Stokes se intensifican.
- 2. La ganancia del proceso FWM se modifica  $\Rightarrow$  las bandas se alejan y se ensanchan espectralmente.



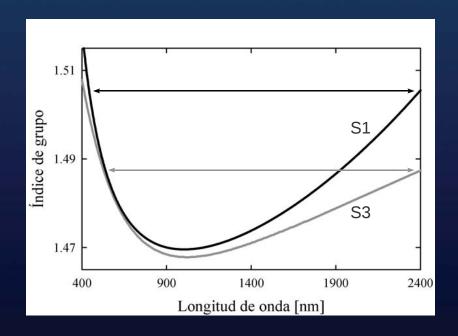
## SCG en función de la dispersión de la fibra

¿Porqué el espectro se extiende hacia longitudes de onda más cortas a medida que la dispersión es mayor?

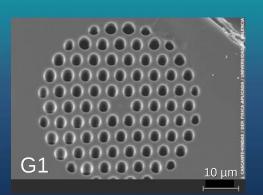
La curva del índice de grupo vs. la longitud de onda se vuelve más asimétrica.

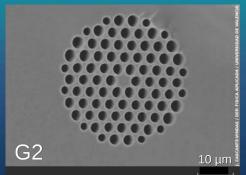


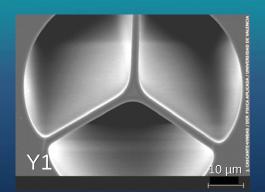
Las ondas dispersivas generadas por los solitones ubicados en 2.4 µm se generan en longitudes de onda mayores.



# MSF dopadas con GeO<sub>2</sub>

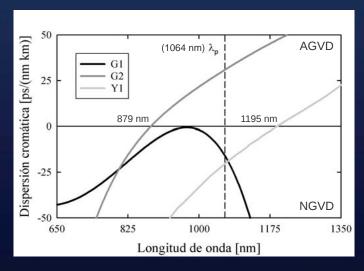




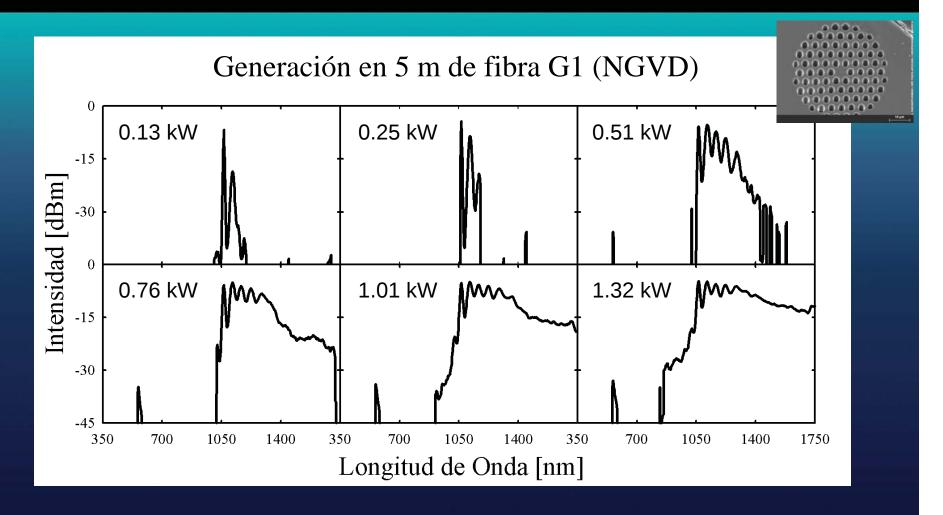


### Ventajas del germanio:

- 1. Mejora la interacción no lineal.
- 2. Reduce las pérdidas de confinamiento.
- 3. Permite perfiles de dispersión diferentes.
- 4. Permite empalmes con pérdidas más bajas.



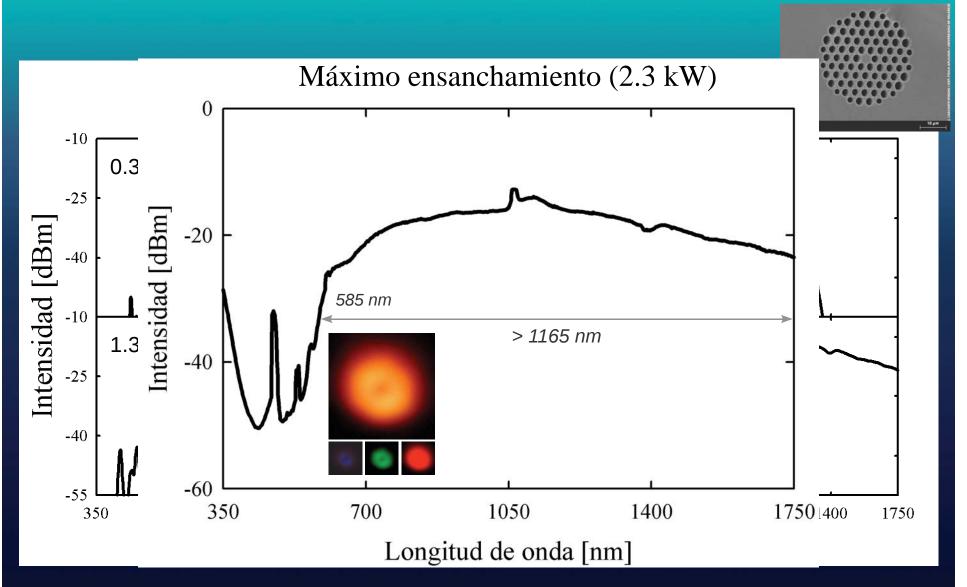
## SCG en G1 en función de la potencia de bombeo



### Dinámica del ensanchamiento:

Proceso SRS en cascada (bandas separadas ~52 nm).

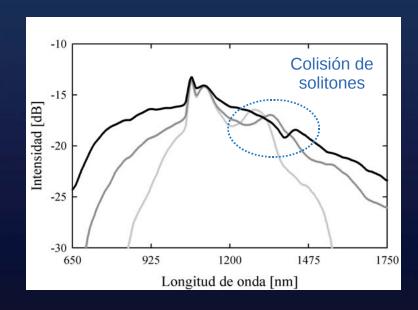
## SCG en G2 en función de la potencia de bombeo

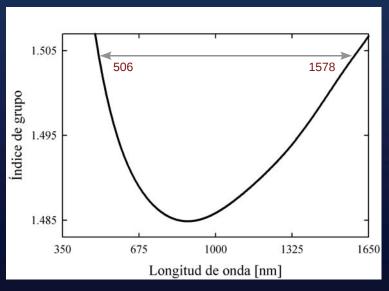


## SCG en G2 en función de la potencia de bombeo

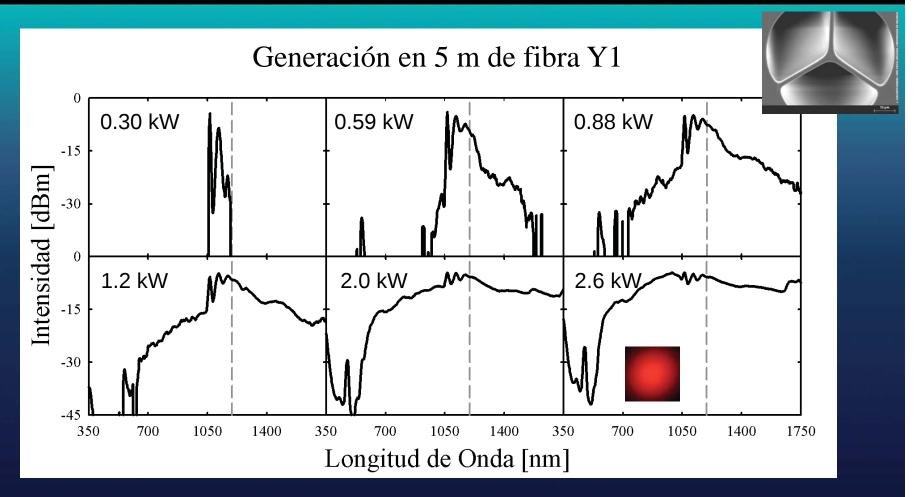
#### Dinámica del ensanchamiento:

- ⇒ Similar a la expuesta con fibras de sílice, con algunas diferencias importantes:
- 1. SRS es más eficiente que FWM en las primeras fases del ensanchamiento.
- 2. La generación hacia longitudes de onda cortas está dominada por FWM y no por ondas dispersivas (DW).
- 3. Hay evidencia de colisión de solitones.





## SCG en Y1 en función de la potencia de bombeo

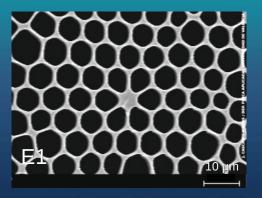


### Dinámica del ensanchamiento:

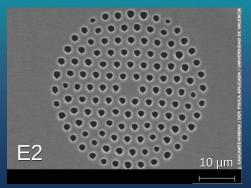
- 1. El bombeo desencadena SRS.
- 2. Los órdenes superiores SRS generan FWM/MI y desencadenan SSFS/DW.

# MSF dopadas con Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

 $D_n = 4.5 \mu m$   $D_{dop} = 1.4 \mu m$   $d/\Lambda = 0.90$   $\gamma > 25$  W<sup>-1</sup> km<sup>-1</sup>

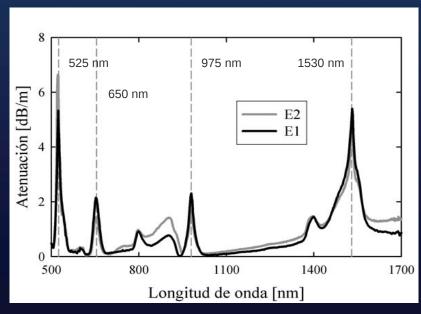


 $D_n = 6.4 \ \mu m$   $D_{dop} = 1.5 \ \mu m$   $d/\Lambda = 0.45 \ \gamma > 15 \ W^{-1} \ km^{-1}$ 

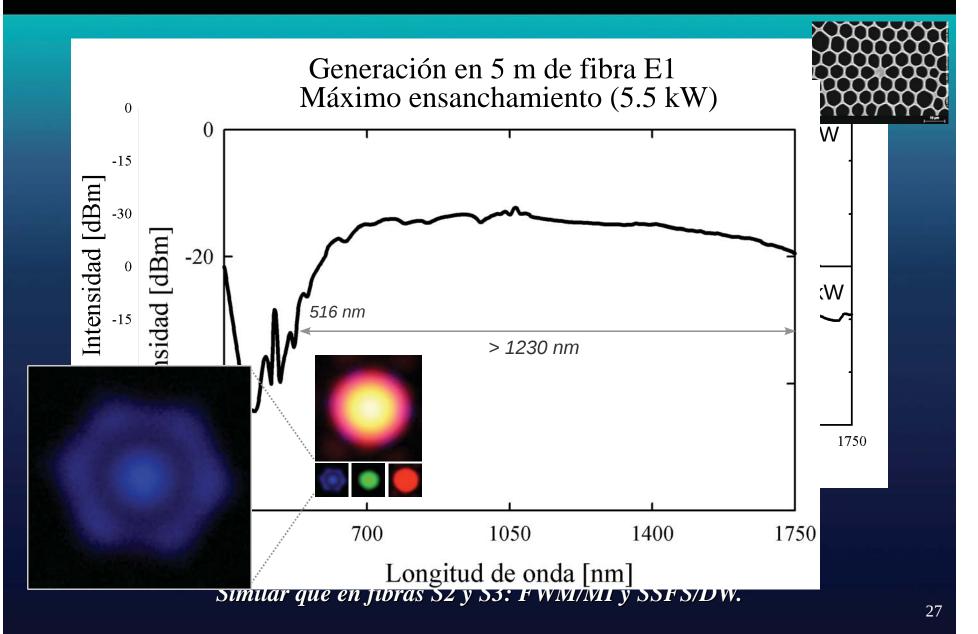


Ventajas del erbio: Mejora la interacción no lineal.

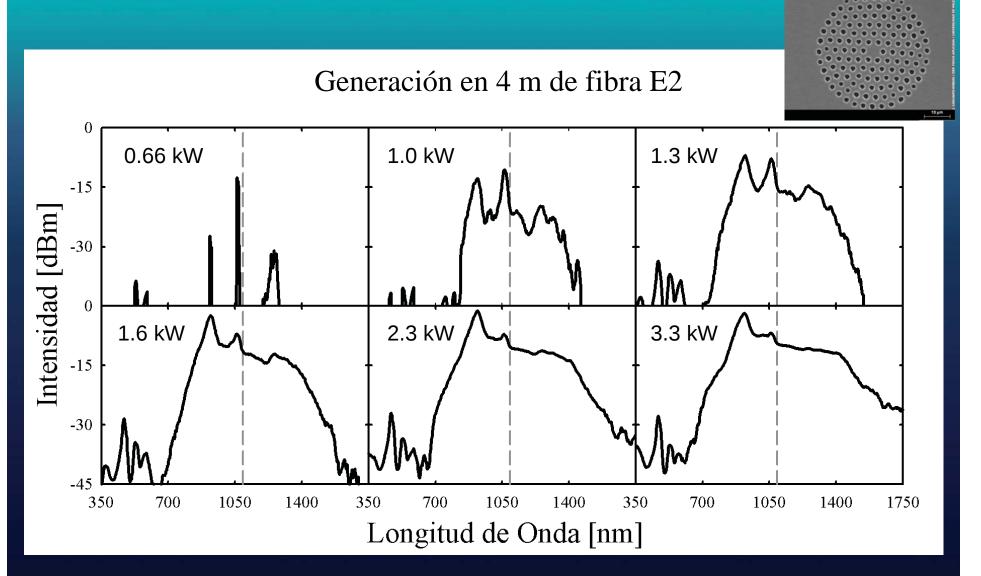
Característica del erbio: Presencia de bandas de absorción.



## SCG en E1 en función de la potencia de bombeo



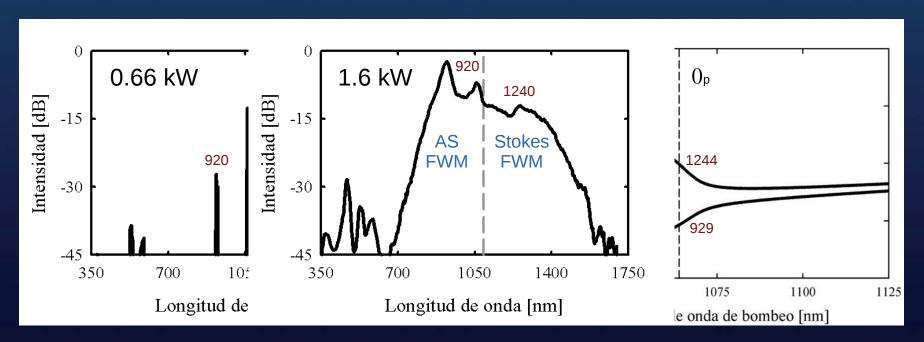
## SCG en E2 en función de la potencia de bombeo



## SCG en E2 en función de la potencia de bombeo

#### En esta dinámica se destaca:

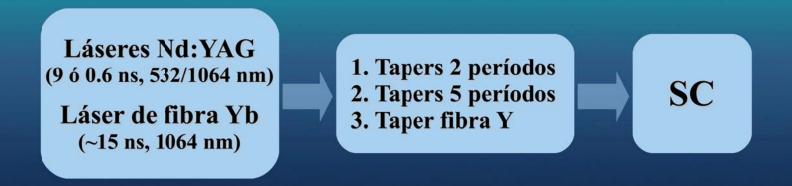
- 1. La generación de bandas FWM por un bombeo en dispersión normal.
- 2. El crecimiento de la banda anti-Stokes FWM y el ensanchamiento de la banda Stokes FWM al aumentar la potencia..



# Esquema de la presentación

- 1. Introducción
- 2. Generación de SC en fibras microestructuradas
- 3. Generación de SC en tapers microestructurados
- 4. Nuevos esquemas de generación
- 5. Conclusiones y proyectos futuros

# Experimentos efectuados



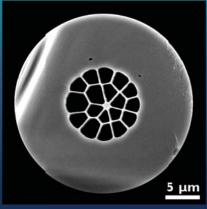
### Dinámica del ensanchamiento

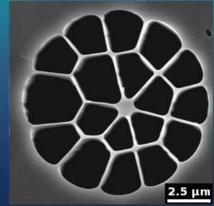
- En función de la potencia de bombeo.
- > Según la dispersión del medio.
- > Con dos longitudes de onda de bombeo 532/1064 nm.
- > A lo largo de los tapers.
- > Al mejorar el confinamiento en el núcleo.

# Tapers de 2 períodos



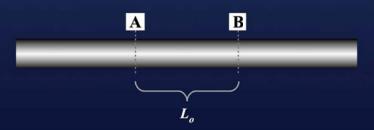
FR ~82%



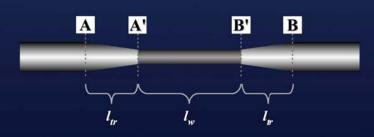


 $D_n \sim 4.7 \ \mu m, \ d/\Lambda \sim 0.94$  $\gamma \sim 25 \ W^{-1} \ km^{-1}$ 







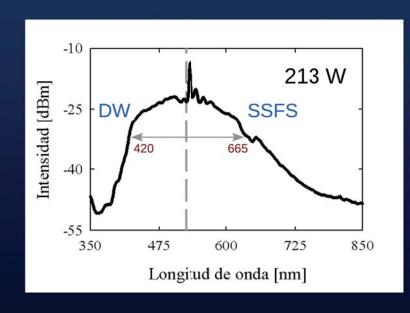


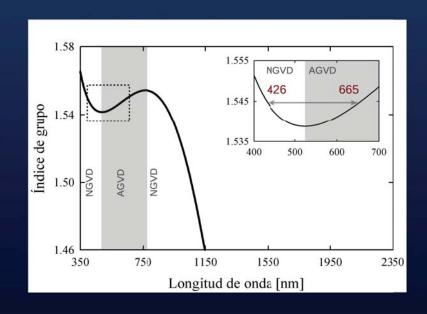
$$l_w \sim 130 \text{ mm}$$
  
 $l_{tr} \sim 113 \text{ mm}$ 

## Tapers de 2 períodos: inyección de 532 nm

#### Dinámica del ensanchamiento en DS1:

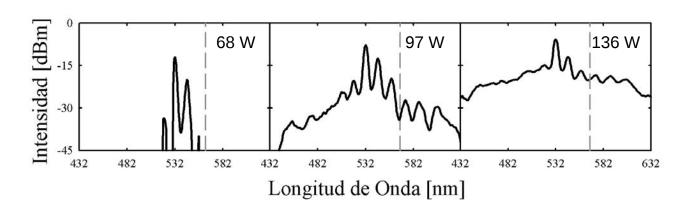
- 1. Generación de banda Stokes SRS a partir del bombeo.
- 2. Generación de FWM/MI a partir del bombeo.
- 3. Incremento de bandas SRS y FWM.
- 4. Desencadenamiento de dinámica SSFS/DW.

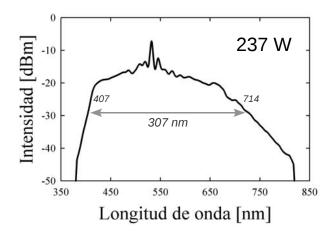




## Tapers de 2 períodos: inyección de 532 nm



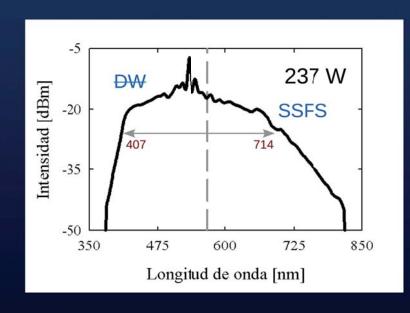


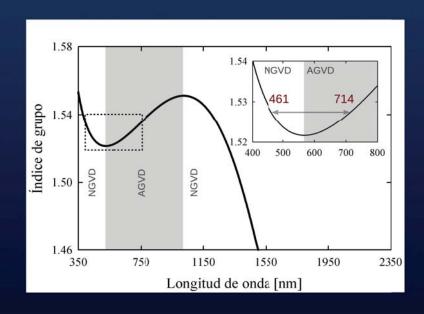


## Tapers de 2 períodos: inyección de 532 nm

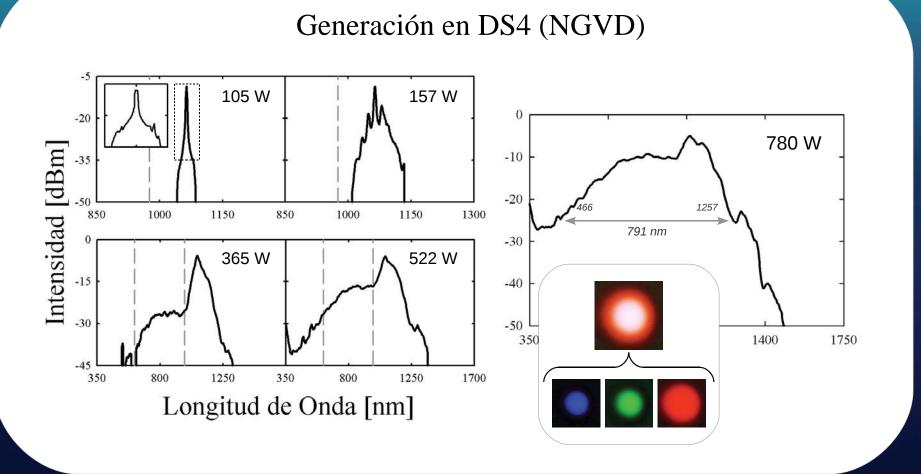
#### Dinámica del ensanchamiento en DS2:

- 1. Generación de SRS a partir del bombeo.
- 2. Generación de órdenes superiores SRS.
- 3. Los órdenes superiores Stokes SRS generan FWM.
- 4. El ensanchamiento es dominado por SRS y FWM.





## Tapers de 2 períodos: inyección de 1064 nm

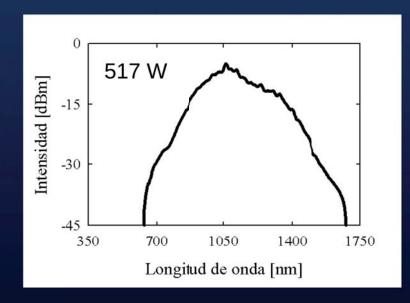


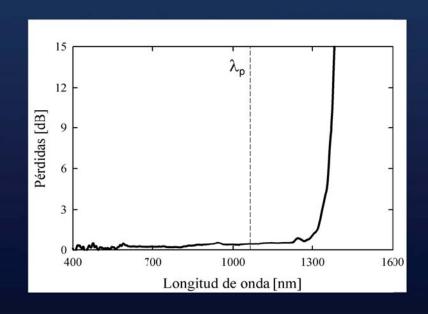
#### 3. SCG en tapers

## Tapers de 2 períodos: inyección de 1064 nm

#### Dinámica del ensanchamiento en DS3:

- 1. Generación de FWM/MI cerca del SZDW.
- 2. Incremento de bandas FWM y proceso en cascada.
- 3. Desencadenamiento de dinámica SSFS/DW cerca del SZDW.
- 4. Limitación de la dinámica por pérdidas.

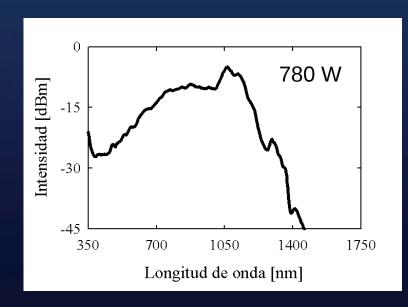


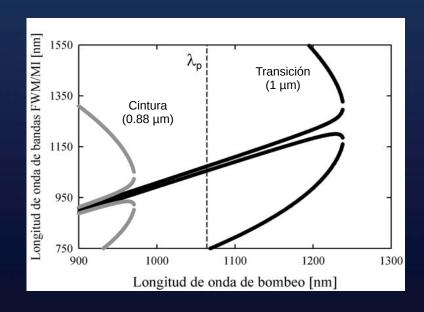


## Tapers de 2 períodos: inyección de 1064 nm

#### En la dinámica del ensanchamiento en DS4 se destaca:

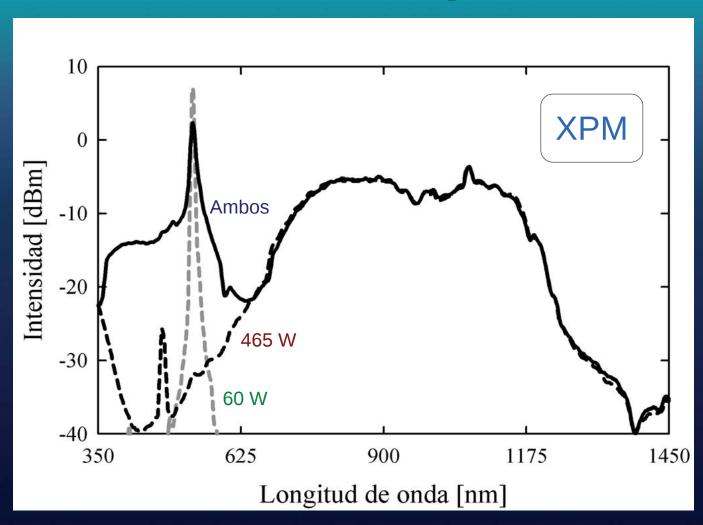
- Generación de FWM en la transición de entrada.
- 2. El ensanchamiento resultante en la transición de entrada funciona como bombeo para la zona de diámetro constante.



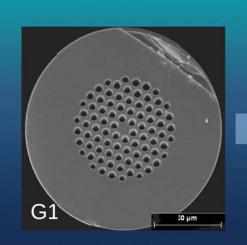


## Tapers de 2 períodos: inyección de 532/1064 nm

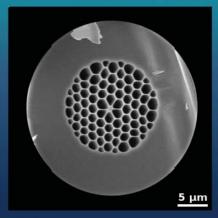
### Caracterización de un taper: DS5

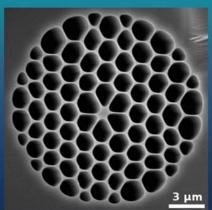


# Tapers de 5 períodos



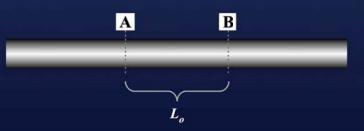
FR ~ 85%



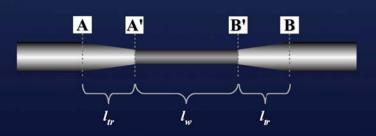


 $D_n \sim 6.1 \ \mu m, \ d/\Lambda \sim 0.71$  $\gamma \sim 31 \ W^{-1} \ km^{-1}$ 

 $D_n \sim 0.9 \ \mu m, \ d/\Lambda \sim 0.82 - 0.93$  $\gamma > 250 \ W^{-1} \ km^{-1}$ 



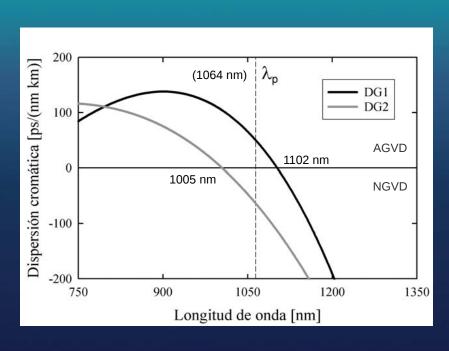
 $L_o \sim 55 \ mm$ 

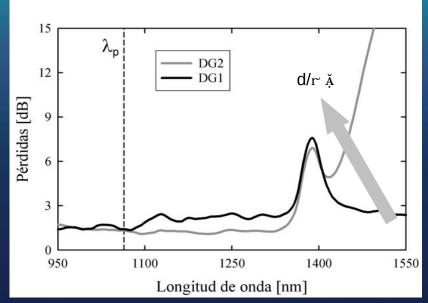


 $l_w \sim 130 \text{ mm}$   $l_{tr} \sim 105 \text{ mm}$ 

# Tapers de 5 períodos

### Caracterización de dos tapers: DG1 y DG2





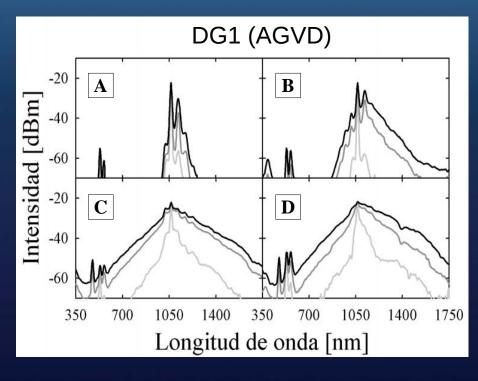
Ventajas de la incorporación de germanio

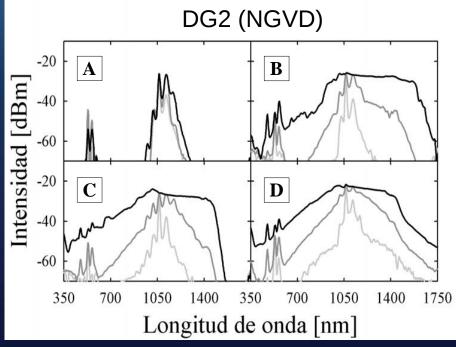
 $\hat{\mathbf{U}}$ 

Mejora el confinamiento, reduciendo así las pérdidas de guiado

## Tapers de 5 períodos: evolución a lo largo del taper







Hay un ligero ensanchamiento en la transición de entrada.

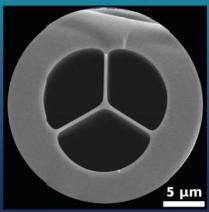
Las transiciones son importantes para la generación de supercontinuo.

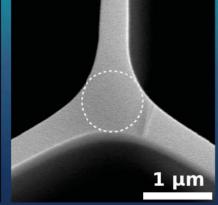
#### 3. SCG en tapers

# Taper de fibra Y



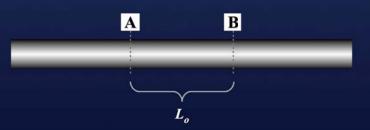
FR ~ 83%



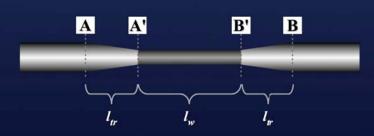


 $D_n \sim 5.2 \ \mu m, \ d/\Lambda \sim 0.93$  $\gamma \sim 31 \ W^{-1} \ km^{-1}$ 





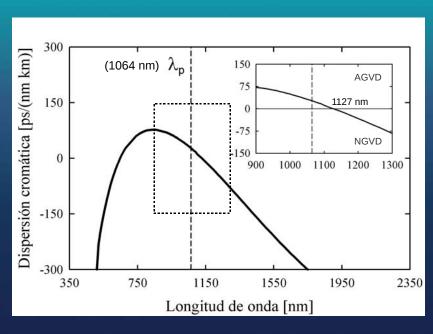


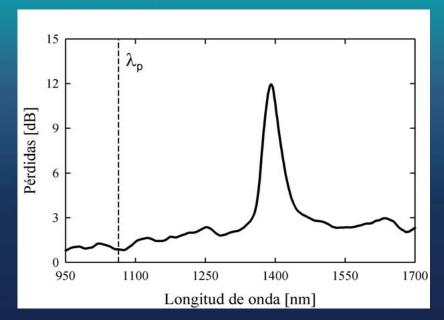


$$l_w \sim 130 \text{ mm}$$
  
 $l_{tr} \sim 111 \text{ mm}$ 

## SCG en taper de fibra Y

### Caracterización de un taper: DY1



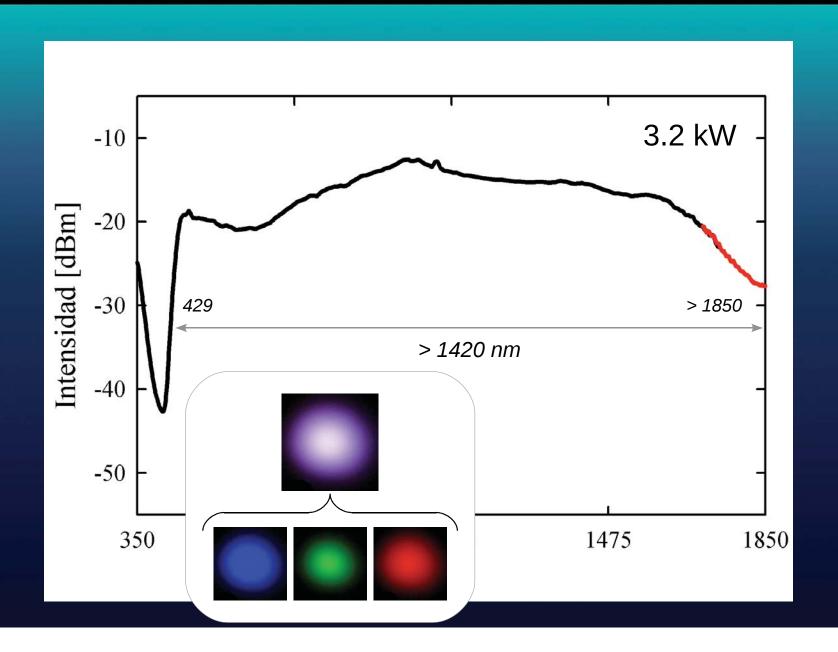


Ventajas al utilizar este tipo de fibra

 $\hat{\mathbb{T}}$ 

La acción combinada del germanio y una gran fracción de relleno mejora las pérdidas de guiado.

## SCG en taper de fibra Y

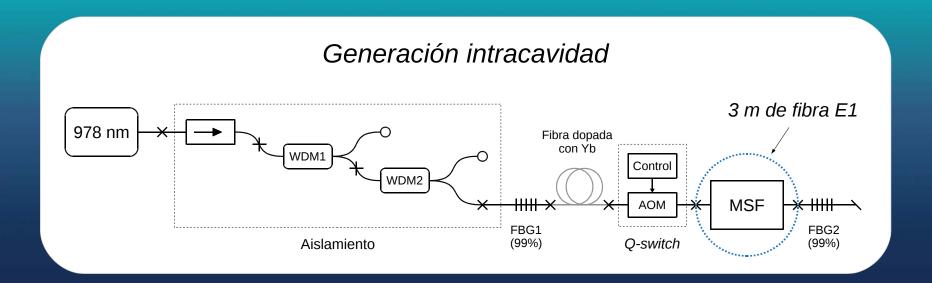


# Esquema de la presentación

- 1. Introducción
- 2. Generación de SC en fibras microestructuradas
- 3. Generación de SC en tapers microestructurados
- 4. Nuevos esquemas de generación
- 5. Conclusiones y proyectos futuros

#### 4. Nuevos esquemas de generación

## Experimento efectuado

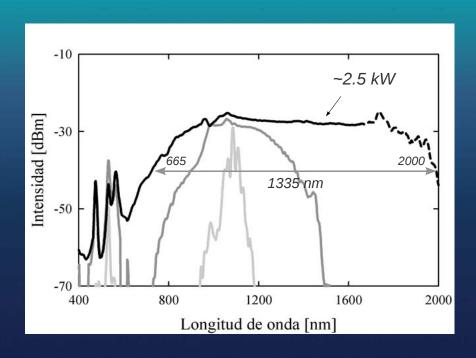


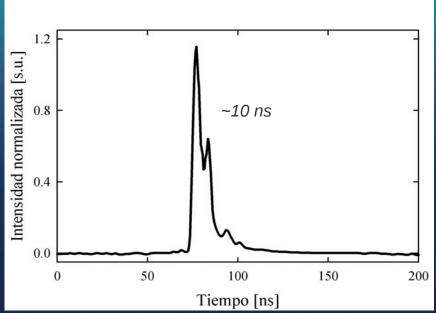
### Ventajas con respecto a sistemas extracavidad:

- 1. Se puede aprovechar la gran cantidad de energía de la cavidad láser.
- 2. La salida del sistema es compatible con sistemas de fibra convencional.
- 3. El SC generado a la salida no presenta un remanente importante de bombeo.

#### 4. Nuevos esquemas de generación

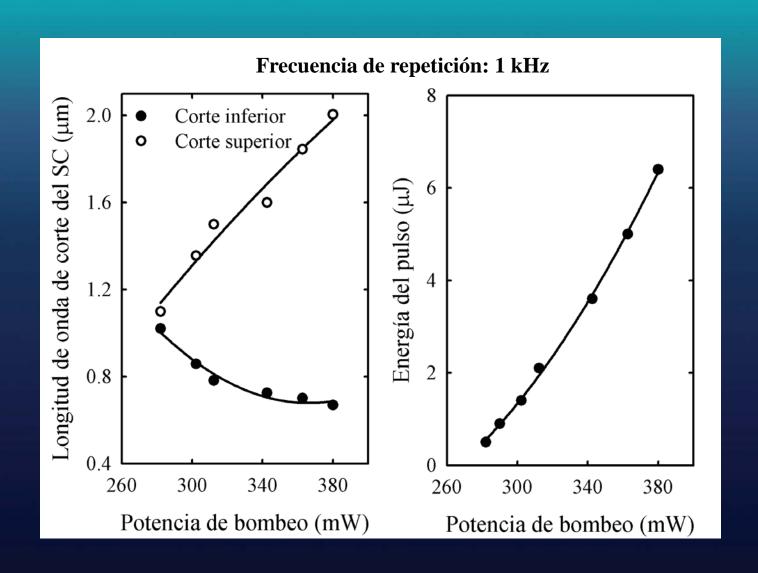
## SCG intracavidad con 3 m de fibra E1





La dinámica del ensanchamiento es similar a la ya explicada para fibras en dispersión anómala: FWM, SSFS y DW.

## SCG intracavidad con 3 m de fibra E1



# Esquema de la presentación

- 1. Introducción
- 2. Generación de SC en fibras microestructuradas
- 3. Generación de SC en tapers microestructurados
- 4. Nuevos esquemas de generación
- 5. Conclusiones y proyectos futuros

#### 5. Conclusiones y proyectos futuros

### Conclusiones destacables

- 1. La SCG con bombeos cuasicontinuos está gobernada principalmente por la combinación de FWM, SRS y la dinámica de los solitones.
- 2. El ensanchamiento en fibras se maximiza si: (1) la dispersión es anómala a la  $\lambda_p$  y (2) la curva del índice de grupo es simétrica. Ajustar la polarización del haz de entrada puede mejorar la SCG. La incorporación de germanio o erbio en el núcleo de las fibras también pueden mejorarla.
- 3. Las pérdidas en los tapers se reducen al aumentar el número de períodos y/o la fracción de relleno. La presencia de germanio en el núcleo también ayuda. La fibra en Y es ideal para fabricarlos.
- 4. El ensanchamiento en tapers se maximiza si: (1) acercamos la SZDW a un bombeo de 1064 nm y (2) se reducen las pérdidas por radiación. La generación en el visible puede mejorarse con un doble bombeo de 532/1064 nm.
- 5. Las transiciones de los tapers pueden llegar a ser importantes en la SCG.
- 6. Se demostró la generación intracavidad en un láser de fibra Q-switch Yb.

### Proyectos futuros

- 1. Explorar más a fondo la generación de SC en fibras Y.
- 3. Investigar la generación de SC en fibras con el núcleo dopado con otras tierras raras (por ejemplo el iterbio).
- 5. Analizar con más detalle la generación de efectos no lineales en las transiciones de los tapers.
- 7. Investigar la generación de SC intracavidad con tapers fabricados a partir de fibras Y.

# ¡Muchas gracias!

¿De qué sirve el ingenio cuando no nos divierte? No hay nada más fatigoso que un ingenio triste.