

Generación Pulsada en Láseres de Fibra Óptica

Erwin A. Martí-Panameño

Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
México

San José, Costa Rica, 9 de Mayo, 2012



Plan de la Presentación

1 Introducción: Regímenes de Generación Pulsados

- Pulsos Luminosos

2 Q-Switching

- Mecanismos de Modulación de Q.

3 Amarre de Modos

- Descripción Temporal del Amarre de Modos
- Amarre de Modos en Láseres de Fibra Óptica

4 Conclusiones



Un láser de fibra óptica dopada con iones de elementos de Tierras Raras, es una buena fuente de radiación óptica. Puede ser explotada en otras aplicaciones más avanzadas como la generación de pulsos luminosos cortos y ultracortos.

Mediante múltiples estadios de amplificación se pueden obtener potencias pico del orden de los GW y duraciones femtosegundo.



Un pulso luminoso u óptico es un destello de radiación electromagnética, que se caracteriza entre otras cosas por:



Un pulso luminoso u óptico es un destello de radiación electromagnética, que se caracteriza entre otras cosas por:

- 1 Duración temporal τ_0



Un pulso luminoso u óptico es un destello de radiación electromagnética, que se caracteriza entre otras cosas por:

- 1 Duración temporal τ_0
- 2 Forma del Pulso



Un pulso luminoso u óptico es un destello de radiación electromagnética, que se caracteriza entre otras cosas por:

- 1 Duración temporal τ_0
- 2 Forma del Pulso
- 3 Potencia Pico



Un pulso luminoso u óptico es un destello de radiación electromagnética, que se caracteriza entre otras cosas por:

- 1 Duración temporal τ_0
- 2 Forma del Pulso
- 3 Potencia Pico
- 4 Energía portada



Un pulso luminoso u óptico es un destello de radiación electromagnética, que se caracteriza entre otras cosas por:

- 1 Duración temporal τ_0
- 2 Forma del Pulso
- 3 Potencia Pico
- 4 Energía portada
- 5 Fase . . .
etc.



Existen varias formas de definirla, la más común es a partir del ancho temporal total de la mitad de la intensidad pico.

Conocido como duración FWHM.

Son comunes en óptica pulsos en los rangos de nanosegundo a femtosegundo.



Representación gráfica de la perturbación luminosa en función del tiempo.

Las formas más típicas son:

- Gaussiana



Representación gráfica de la perturbación luminosa en función del tiempo.

Las formas más típicas son:

- Gaussiana
- sech^2



Representación gráfica de la perturbación luminosa en función del tiempo.

Las formas más típicas son:

- Gaussiana
- sech^2
- Hipergaussiana



Representación gráfica de la perturbación luminosa en función del tiempo.

Las formas más típicas son:

- Gaussiana
- sech^2
- Hipergaussiana
- Lorentziana . . .
etc.



Una de las grandes ventajas de trabajar con pulsos luminosos es la posibilidad de alcanzar potencias pico desde los Kilowatts hasta Terawatts:

$$P_P = f_f \frac{E_p}{\tau_0}$$

$f_f = 0,94$ y $0,88$ para pulsos gaussianos y sech, respectivamente.



Una de las grandes ventajas de trabajar con pulsos luminosos es la posibilidad de alcanzar potencias pico desde los Kilowatts hasta Terawatts:

$$P_P = f_f \frac{E_p}{\tau_0}$$

$f_f = 0,94$ y $0,88$ para pulsos gaussianos y sech, respectivamente.

$E_p = 1mJ$ y $\tau_0 = 10fs$ producen:



Una de las grandes ventajas de trabajar con pulsos luminosos es la posibilidad de alcanzar potencias pico desde los Kilowatts hasta Terawatts:

$$P_P = f_f \frac{E_p}{\tau_0}$$

$f_f = 0,94$ y $0,88$ para pulsos gaussianos y sech, respectivamente.

$E_p = 1mJ$ y $\tau_0 = 10fs$ producen:

$$P_P \sim 100MW$$



Potencias de cientos de GW e incluso TW se obtienen a partir de sistemas de amplificación.



Potencias de cientos de GW e incluso TW se obtienen a partir de sistemas de amplificación.

Alternativa para energía limpia: Fusión Nuclear Controlada por láser

<http://www.hiper-laser.org>



Un pulso Limitado por Transformada de Fourier (LTF) es aquel cuyo producto duración por ancho de banda es mínimo. Concepto aplicado a pulsos no chispeados.



Un pulso Limitado por Transformada de Fourier (LTF) es aquel cuyo producto duración por ancho de banda es mínimo. Concepto aplicado a pulsos no chispeados.

- Pulso Gaussiano: $\Delta\nu \cdot \tau_0 \approx 0,44$



Un pulso Limitado por Transformada de Fourier (LTF) es aquel cuyo producto duración por ancho de banda es mínimo. Concepto aplicado a pulsos no chispeados.

- Pulso Gaussiano: $\Delta\nu \cdot \tau_0 \approx 0,44$
- Pulso Sech: $\Delta\nu \cdot \tau_0 \approx 0,32$



Detengámonos en las técnicas de generación de Pulsos Luminosos Cortos.

Nos centraremos en dos técnicas fundamentales y diferentes en su operación:



Detengámonos en las técnicas de generación de Pulsos Luminosos Cortos.

Nos centraremos en dos técnicas fundamentales y diferentes en su operación:

- Q-Switching o régimen de pulsos gigantes. $E_p \sim mJ - J$ y $\tau_0 \sim \mu s - ns$.



Detengámonos en las técnicas de generación de Pulsos Luminosos Cortos.

Nos centraremos en dos técnicas fundamentales y diferentes en su operación:

- Q-Switching o régimen de pulsos gigantes. $E_p \sim mJ - J$ y $\tau_0 \sim \mu s - ns$.
- Mode Locking o Amarre de Modos: $E_p < \mu J$ y $\tau_0 \sim ps - fs$.



El regimen de Q-switching encuentra múltiples aplicaciones. En la industria como un elemento para cortar y grabar materiales. En medicina para operaciones de desprendimiento de retina. En dermatología, para remediar imperfecciones de la piel, remover tatuajes, etc.



Factor de Calidad de una Cavidad Láser: Q

Uno de los parámetros más relevantes en la caracterización del desempeño de láseres se da a partir de la cavidad láser. Como circuito oscilatorio, su calidad se evalúa a partir del factor-Q:

$$Q = \frac{\text{Energía Almacenada}}{\text{Energía perdida por ciclo}}$$

Esta expresión puede llevarse a:



Factor de Calidad de una Cavidad Láser: Q

$$Q = \frac{\text{Frecuencia central}}{\text{Ancho de banda FWHM de la cavidad}}$$

Es decir:



Factor de Calidad de una Cavidad Láser: Q

$$Q = \frac{\text{Frecuencia central}}{\text{Ancho de banda FWHM de la cavidad}}$$

Es decir:

$$Q = \frac{\nu}{2\delta\nu_c}$$

Donde (para una cavidad FP):

$$\delta\nu_c = \frac{1}{4\pi} \left[\frac{c}{2L} \ln \left(\frac{1}{r_1 r_2} \right) \right]$$



Factor de Calidad de una Cavidad Láser: Q

Si Q es grande la cavidad presenta bajas pérdidas y consecuentemente estamos ante mejores condiciones para el laseo. Haciendo

$$Q = Q(t)$$

Podemos crear condiciones para que el medio activo almacene energía y después sacarla del láser en un tiempo corto.



Diagrama esquemático de un láser Modulado en Q

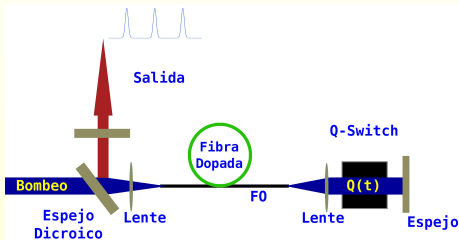


Figura: Láser en régimen Q-switch



Mecanismos de Modulación de Q.

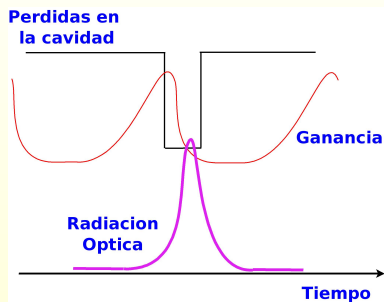


Figura: Dinámica entre Ganancia y Pérdidas en un láser Modulado en Q



Al interior de la cavidad se inserta un elemento bloqueando la emisión estimulada, a la vez que el bombeo se mantiene. Esto permite que el medio activo acumule energía. Ante una súbita

- Espejo rotante.



Al interior de la cavidad se inserta un elemento bloqueando la emisión estimulada, a la vez que el bombeo se mantiene. Esto permite que el medio activo acumule energía. Ante una súbita

- Espejo rotante.
- Switches electroópticos.



Al interior de la cavidad se inserta un elemento bloqueando la emisión estimulada, a la vez que el bombeo se mantiene. Esto permite que el medio activo acumule energía. Ante una súbita

- Espejo rotante.
- Switches electroópticos.
- Switches Acustoópticos.



Al interior de la cavidad se inserta un elemento bloqueando la emisión estimulada, a la vez que el bombeo se mantiene. Esto permite que el medio activo acumule energía. Ante una súbita

- Espejo rotante.
- Switches electroópticos.
- Switches Acustoópticos.
- Absorvedores saturables.



Algunos parámetros:

- Láseres de estado sólido, duraciones de decenas de ns, intensidades pico de GW, decenas de J.
- Láser todo fibra (Er): Potencias pico decenas de KW.
 $\tau \sim 50ns - 1\mu s$. Energía 1J ¹

¹ A.S. Kurkov, Laser Phys. Lett. V 8, N 5, p.335, (2011)



- Es posible generar pulsos de duraciones menores a las obtenidas mediante Q-switch, e intensidades pico mayores. Diferencia en varios órdenes de magnitud.
- Láser en Amarre de Modo



Con esta técnica es posible generar pulsos ópticos en el límite teórico:

$$\tau_0 \sim T_0$$

donde T_0 es el período de oscilación de la frecuencia portadora.

Necesitamos láseres con un gran número de modos longitudinales.



En general los Modos Electromagnéticos, no están ligados unos a otros. Sus relaciones de fase son aleatorias. Sabemos que la condición de resonancia de la cavidad impone la relación a las longitudes de onda a emitirse

$$\lambda_n = \frac{2L}{n}$$

donde n es un número muy grande. λ_n debe estar contenidos bajo la línea de emisión del medio activo.



Si los logramos poner los modos en fase, tendremos un régimen de generación completamente nuevo: el **amarre de modos** (o Mode Locking), el cual permite la generación de pulsos luminosos de muy corta duración y, bajo determinadas condiciones, de altas intensidades.



Si los logramos poner los modos en fase, tendremos un régimen de generación completamente nuevo: el **amarre de modos** (o Mode Locking), el cual permite la generación de pulsos luminosos de muy corta duración y, bajo determinadas condiciones, de altas intensidades.

A diferencia del Q-Switching, en Amarre de Modos forzamos las propiedades de generación del láser.



Si los logramos poner los modos en fase, tendremos un régimen de generación completamente nuevo: el **amarre de modos** (o Mode Locking), el cual permite la generación de pulsos luminosos de muy corta duración y, bajo determinadas condiciones, de altas intensidades.

A diferencia del Q-Switching, en Amarre de Modos forzamos las propiedades de generación del láser. Q-Switching puede alcanzarse en láseres de un sólo modo, mientras que Amarre de Modos es indispensable la operación multimodal.



Descripción Temporal del Amarre de Modos

Consideremos que el láser emite N modos longitudinales, cada uno con su frecuencia ω_l e igualmente espaciados $\Delta\omega$, de igual fase y amplitud. Cada modo puede ser caracterizado por:



Descripción Temporal del Amarre de Modos

Consideremos que el láser emite N modos longitudinales, cada uno con su frecuencia ω_l e igualmente espaciados $\Delta\omega$, de igual fase y amplitud. Cada modo puede ser caracterizado por:

$$x_l(t) = x_0 \sin(\omega_n t + \phi_0) = \text{Im } x_0 \exp i(\omega_n t + \phi_0)$$

donde

$$\omega_l = \omega_0 + l\Delta\omega$$
$$l = -\frac{N-1}{2}, -\frac{N-1}{2} + 1, -\frac{N-1}{2} + 2, \dots, \frac{N-1}{2}$$



La suma:

$$X(t) = \sum_l x_l(t) = x_0 Im \left(\sum_l \exp i(\omega_0 + \phi_0 + l\Delta\omega t) \right)$$

o bien

$$X(t) = x_0 Im \left(\exp i(\omega_0 t + \phi_0) \sum_l \exp (il\Delta\omega t) \right)$$

donde ω_0 – frecuencia central.



Empleemos la identidad general:

$$\sum_{-(N-1)/2}^{(N-1)/2} e^{ily} = \frac{\sin(Ny/2)}{(y/2)}$$

de donde,

$$X(t) = x_0 \sin(\omega_0 t + \phi_0) \frac{\sin(N\Delta\omega t/2)}{\sin(\Delta\omega t/2)}$$



Empleemos la identidad general:

$$\sum_{-(N-1)/2}^{(N-1)/2} e^{ily} = \frac{\sin(Ny/2)}{(y/2)}$$

de donde,

$$X(t) = x_0 \sin(\omega_0 t + \phi_0) \frac{\sin(N\Delta\omega t/2)}{\sin(\Delta\omega t/2)}$$

$$X(t) = A_n(t) \sin(\omega_0 t + \phi_0)$$

con

$$A_n(t) = x_0 \frac{\sin(N\Delta\omega t/2)}{\sin(\Delta\omega t/2)}$$



$$A_n(t) = x_0 \frac{\sin(N\Delta\omega t/2)}{\sin(\Delta\omega t/2)}$$

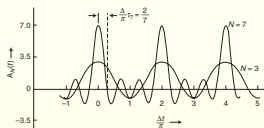


Figure 6.7 The function $A_n(t) = \sin(\frac{1}{2}N\Delta x) / \sin(\frac{1}{2}\Delta x)$ vs. $\Delta x / \pi$.

Figura: Láser en régimen Q-switch. Esta figura se va a cambiar por una simulación en clase empleando mathematica. Esta fig es tomada de Milonni



Para lograr el Amarre de Modos necesitamos, de alguna forma, interactuar con los modos longitudinales.

Se deben poner todos en fase, para lo que se introducirá un modulador.

El período de modulación es el tiempo que tarda la luz en dar una vuelta completa a la cavidad:

$$T_m = 2L_{opt}/c$$



Descripción Temporal del Amarre de Modos

Existen diversos mecanismos para lograr el amarre de modos.
Aquí sólo indicaremos algunos:



Existen diversos mecanismos para lograr el amarre de modos.
Aquí sólo indicaremos algunos:

- Amarre de Modos Activo



Existen diversos mecanismos para lograr el amarre de modos.
Aquí sólo indicaremos algunos:

- Amarre de Modos Activo
 - Amplitud



Existen diversos mecanismos para lograr el amarre de modos.
Aquí sólo indicaremos algunos:

- Amarre de Modos Activo
 - Amplitud
 - Fase



Existen diversos mecanismos para lograr el amarre de modos.
Aquí sólo indicaremos algunos:

- Amarre de Modos Activo
 - Amplitud
 - Fase
- Amarre de Modos Pasivo.



Existen diversos mecanismos para lograr el amarre de modos.
Aquí sólo indicaremos algunos:

- Amarre de Modos Activo
 - Amplitud
 - Fase
- Amarre de Modos Pasivo.
 - Absorvedores saturables ultra-rápidos.



Existen diversos mecanismos para lograr el amarre de modos.
Aquí sólo indicaremos algunos:

- Amarre de Modos Activo
 - Amplitud
 - Fase
- Amarre de Modos Pasivo.
 - Absorvedores saturables ultra-rápidos.
 - Mecanismos de Auto Amarre de modos: KLM, Espejos no lineales, etc.



Amarre de Modos en Láseres de Fibra Óptica

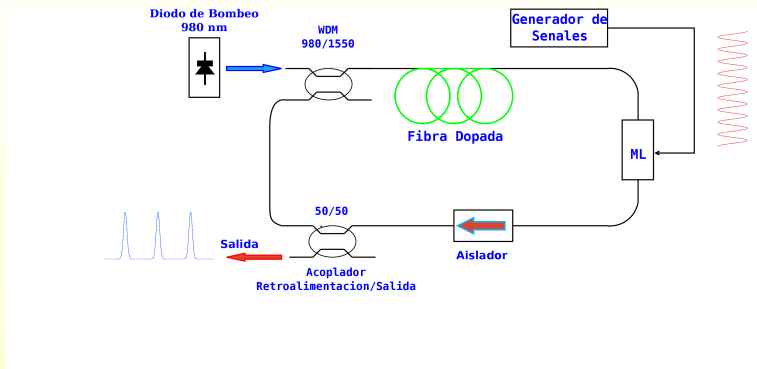


Figura: Láser en régimen de FO con un modulador de Amplitud



Los LFO son muy versátiles para lograr el amarre de modos.

- Espejos no lineales de Lazo.
- Láser de Fibra de doble núcleo.
- etc. . . .

Analizaremos brevemente los dos primeros.



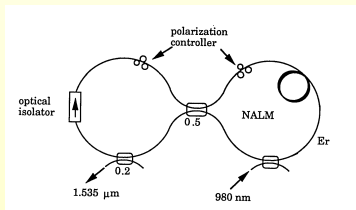
All-fiber ring soliton laser mode locked with a nonlinear mirror

Irl N. Duling III

Naval Research Laboratory, Washington, D.C. 20375

Received December 6, 1990; accepted February 7, 1991

An amplifying nonlinear-optical fiber loop mirror is used as the gain element in an all-fiber ring laser. The resulting double-loop structure resembles a figure eight. The output of the amplifying nonlinear-optical fiber loop mirror is fed back to the input through an optical isolator to ensure unidirectional operation. The laser produces 2-ps transform-limited pulses. The pulse energy corresponds to that of the fundamental soliton in the fiber used.



Láseres de Fibra con espejo de lazo

540 OPTICS LETTERS / Vol. 16, No. 8 / April 15, 1991

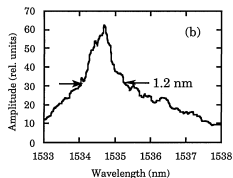
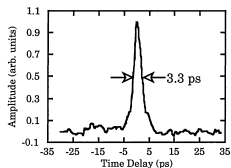


Figura: Pulsos y espectro generados



Láser de Fibra de doble núcleo

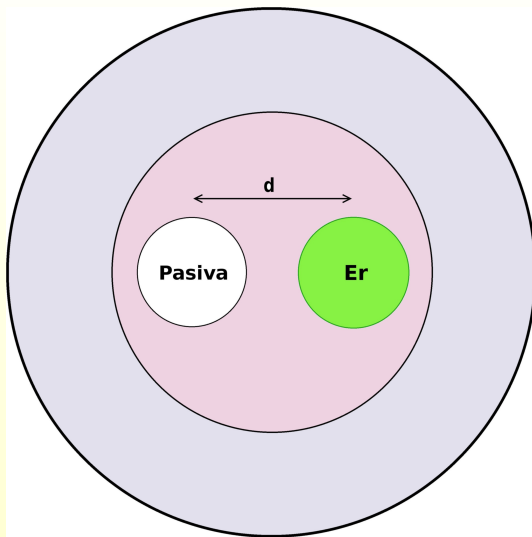


Figura: Sección Transversal de la fibra de doble núcleo





ELSEVIER

15 July 2001

OPTICS
COMMUNICATIONS

Optics Communications 194 (2001) 409–414

www.elsevier.com/locate/optcom

Self-mode-locking action in a dual-core ring fiber laser

E. Martí-Panameño^a, L.C. Gómez-Pavón^{a,*}, A. Luis-Ramos^a,
M.M. Méndez-Otero^a, M.D. Iturbe Castillo^b

^a *Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Apdo. Postal 1704, 72001 Puebla, Mexico*

^b *Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Apdo. Postal 51 and 216, C.P. 72000 Puebla, Mexico*

Received 7 March 2001; accepted 3 May 2001

Abstract

With the help of numerical experiments we demonstrate the self-starting soliton generation in a dual-core ring fiber laser without any external mode-locking mechanism. This result makes evident that the nonlinear energy switching between the active and the passive cores acts as a self-mode-locking mechanism. © 2001 Published by Elsevier Science B.V.

Keywords: Dual-core; Fiber laser; Mode-locking; Coupling



Láser de Fibra de doble núcleo

412

E. Martí-Panameño et al. / Optics Communications 194 (2001) 409-414

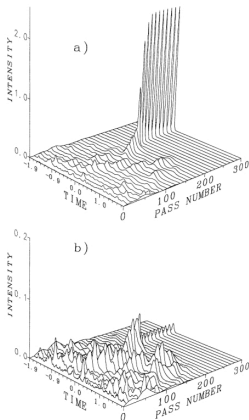


Fig. 1. Evolution of the laser radiation starting from a Gaussian noise: (a) active core and (b) passive core.

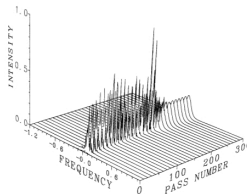


Fig. 2. Spectrum evolution for the laser radiation in the active core.

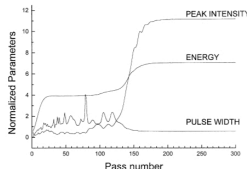


Fig. 3. Evolution of the pulse normalized parameters. The pulse width, intensity, and energy are plotted versus the pass number.

Figura: Proceso auto-amarre de modos y formación de solitones



Hemos discutido una de las propiedades más importantes como es la de generar pulsos de corta duración y alta intensidad. Nos centramos en las principales métodos de trabajo de láseres pulsados: Q-Switching y Amarre de Modos. Analizamos la versatilidad de los láseres de fibra óptica para amarrarse en modos.

