

Laser Safety Regulations: Laser classification/*Sistemas de seguridad con fuentes láser: clasificación de láseres*

Prof. María L. Calvo

1st May / *1 de mayo de 2012 (2 pm/14:00)*

First ICO-ICTP-TWAS Central American Workshop in Lasers, Laser Applications and Laser Safety Regulations, San José de Costa Rica

Objetivos

- Comprender y aplicar el concepto de radiación láser para su manejo en aplicaciones tanto de investigación como industriales.
- Comprender el funcionamiento de las fuentes láser y los parámetros que definen su régimen de funcionamiento.
- Revisar aspectos importantes de la utilización de fuentes láser tanto en la ciencia, como en la industria y la medicina.

Clasificación de las fuentes de radiación

Fuentes luminosas:

- 1.- Fuentes naturales de radiación óptica
- 2.- Descargas eléctricas en gas a baja presión
- 3.- Fenómenos de fluorescencia

Fluctuaciones originadas por emisión espontánea de la radiación de los átomos que generan el campo.

Campo térmico:

Distribución gaussiana del espectro asociado al interferograma

- 4.- Láseres : Fluctuaciones en la fase de la señal (estabilizado)

→ **Monomodo**: Campo sinusoidal

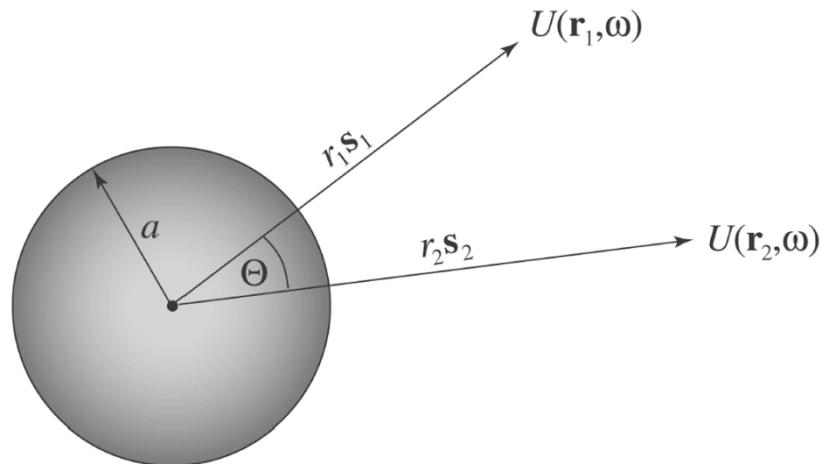
- 5.- Descargas en gas a alta presión → Distribución lorentziana

Fuentes naturales de radiación óptica

- Las fuentes naturales de luz no producen haces de luz extensos y coherentes con un alto grado de coherencia espacio-temporal.

- Ejemplo: la luz solar.**

En 1869 el físico francés Émile Verdet publicó un trabajo sobre la medida de la coherencia espacial del sol como fuente de radiación (*).



El sol como fuente circular plana incoherente

Placa fotográfica

Para luz solar filtrada $a: \lambda = 500 \text{ nm.};$
 $a = 6,96 \times 10^5 \text{ km}, r.$ distancia Tierra-Sol = $1,5 \times 10^8 \text{ km}.$

Área de coherencia:

$$\Delta A \approx 3.67 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$$

Equivalente a aplicar el teorema de Van Citter-Zernike (**).

Y con:

$$\Delta \Theta = 4.5 \times 10^{-16} \text{ rad}$$

(*): G. S. Agarwal, G. Gbur and E. Wolf, "Coherence properties of Sunlight", March 1, 2004 / Vol. 29, No. 5 / OPTICS LETTERS 459.

(**): Ver notas de las clases del día 2 de mayo 2012 sobre coherencia (M.L. Calvo).

La radiación láser

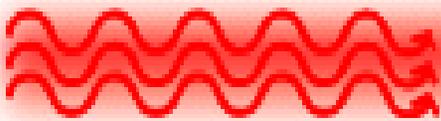
- La luz láser es radiación estimulada y amplificada.
- LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)
- Se generan haces de fotones emitiendo en concordancia de fase.
- La ley de Planck nos dice: $E = h\nu$, $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

● Incoherent light



Energía asociada a un fotón.
Para un alto número N de fotones la energía total puede tomar valores muy altos.

● Coherent light



Se han desarrollado fuentes láser de femtosegundos que emiten a $400 \text{ W (J}\cdot\text{s}^{-1})$

Elementos que constituyen una fuente láser

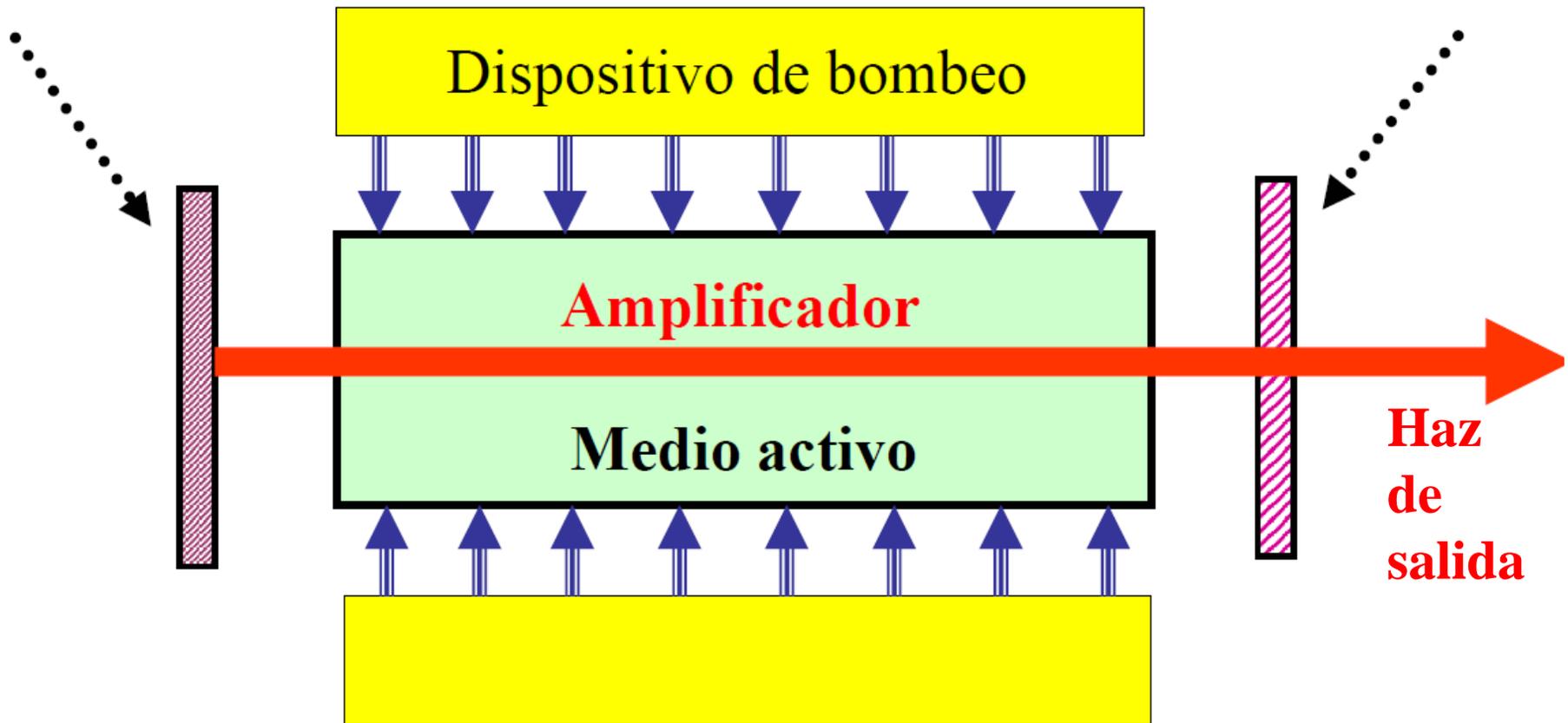
Un espejo totalmente reflectante



Cavidad lineal

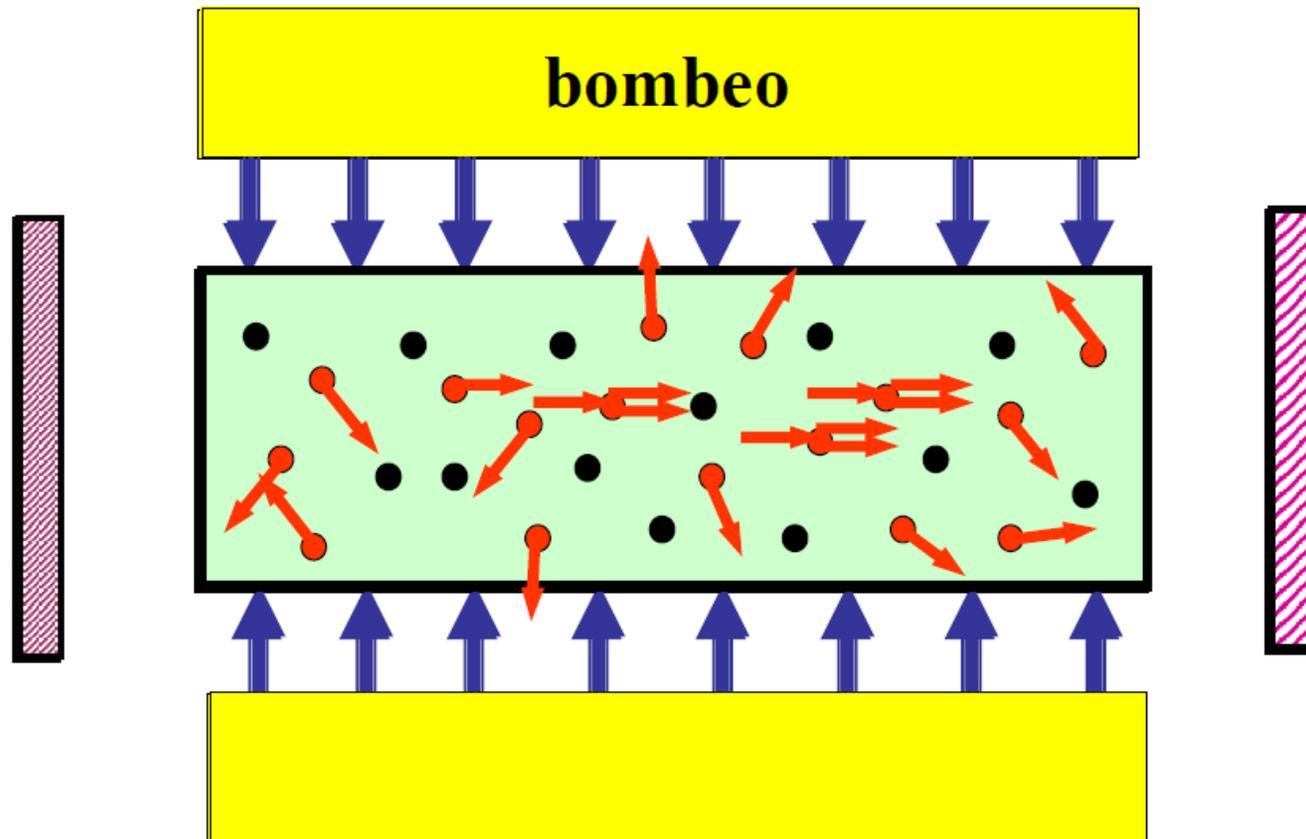


Un espejo parcialmente reflectante



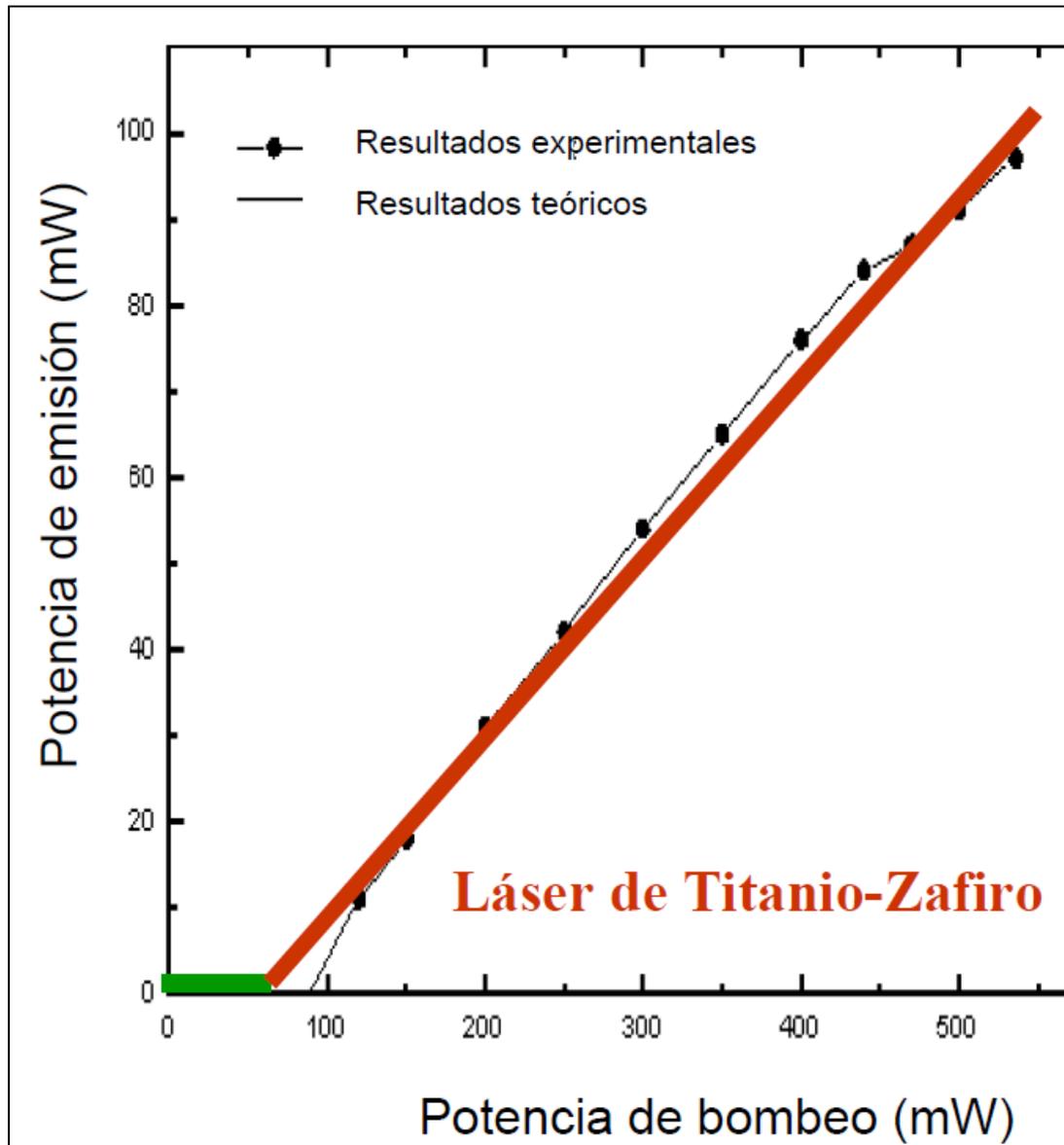
Si los espejos están perfectamente paralelos se obtiene emisión láser

Umbral: Inicio de emisión



Emisión estimulada para ciertos fotones de emisión espontánea

Valores umbrales para la emisión láser



Curva operacional para un láser pulsado de Ti:Zafiro.

Con pulsos de femtosegundos.
Femto: 10^{-15} .

Condición umbral :

La energía ganada por el amplificador es superior a la energía perdida en la cavidad

Tipos de láseres

- Los tipos de fuentes láser se definen atendiendo a las características del medio activo que constituye (o está incluido) en la cavidad resonantes.
- Ello implica la configuración de la estructura atómica de los componentes que intervienen.
- **Láseres de 3 y 4 niveles atómicos**
 1. Láseres a gas:
 - Láser de helio-neón (He-Ne: primer modelo en 1961).
 - Láseres de gases nobles: láser de argón (Ar^+)
 - Láser de N_2 (primer modelo en 1963). Es fácil de construir(*)).
 - Láser de CO_2 .
 - Láseres de excímeros (moléculas diatómicas inestables). Ejemplos: ArF^* (argón-flúor), KrF^* (kriptón-flúor), XeCl^* (xenón-cloro).
 2. Láseres en estado líquido:
 - Láseres de colorantes. Ejemplo: rodamina G6.
 3. Láseres de estado sólido:
 - Láser de rubí (Theodor Maiman, 1960).
 - Láser de Nd:YAG (YAG: granate de ytrio y aluminio $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$). Bombeo óptico.
 - Láser de titanio-zafiro, sintonizable, emisión de pulsos ultracortos (100 fs).
 - Láseres de centros de color. Ejemplo: $\text{KCl}:\text{Li}$. Operan a 77 K.
 - Láseres de fibra.
 - Láseres de diodo (láseres de semiconductores).

(*) ver *Scientific American*, Strong (1974).

	Medio activo	Longitud de onda	Régimen	Potencia o energía típicas	Aplicaciones
GAS	He-Ne	632 nm 1.153 μm 3.391 μm	Continuo	0.5-5 mW	Alineamiento Lectura de datos Holografía Medicina Comunicaciones Metrología
	Ar ⁺	488 nm 514.5 nm	Continuo	2-10 W	Bombeo óptico
	CO ₂	9.6 μm 10.6 μm	Continuo Pulsado $\Delta t \approx \mu\text{s}$ a ns	KW GW	Plasma Procesado materiales Cirugía
	N ₂	337 nm	Pulsado, $\Delta t \approx 4$ ns	1 mJ/pulso	Bombeo de colorantes
	Excímero	193 nm ArF ⁺ 248 nm KrF ⁺ 309 nm XeCl 351 nm XeF	Pulsado, $\Delta t \approx 10$ ns	500 mJ/pulso	Bombeo de colorantes Refractometría ocular Procesado materiales
LÍQUIDO	Colorantes	IR cercano a UV cercano, según colorante y disolvente. Sintonizables.	Continuo Pulsado $\Delta t \approx 1 \mu\text{s}$ $\Delta t \approx 10$ ns bloqueo de modos: $\Delta t \approx 200$ ps	0.1-3 W 1 J/pulso 50 mJ/pulso 1 W	Espectroscopia Terapia tumoral
SÓLIDO	Rubí	692.8 nm 694 nm	pulsado $\Delta t \approx 1$ ms $\Delta t \approx 10$ ns $\Delta t \approx 20$ ns	50 J 1 J 0.1 J	Holografía
	YAG-Nd	1.064 μm 1.061 μm 1.3 μm	Continuo Pulsado $\Delta t \approx 1$ ms $\Delta t \approx 10$ ns bloqueo de modos: $\Delta t \approx 30$ ps	10 W-KW 10-100 KW 10 MW GW	Generación de plasma por fusión. Cauterización Procesado materiales
	Titanio-zafiro	790 nm. sintonizable	Pulsado $\Delta t \approx 100$ fs	1 nJ/pulso	Óptica no-lineal
	Centros de color	2.3 μm -3.3 μm según huésped y dopado	Continuo	100 mW	Espectroscopia
	Láseres de fibra	3.4 μm 1.55 μm 0.98 μm 0.85 μm	Continuo	10 W	Comunicaciones ópticas
	Diodo	azul a IR cercano según estructura y dopado. Sintonizables.	Continuo	10-1.000 mW	Comunicaciones ópticas Almacenamiento datos

Tabla tipos de láseres (*)

- Se especifican los parámetros y características fundamentales para su definición:
 - Medio activo
 - Longitud de onda de emisión (línea espectral).
 - Régimen de emisión de la radiación: continuo o pulsado.
 - Potencia de salida (W) o energía típica (J/pulso). Fluencia J/s.
 - Aplicaciones: investigación científica, espectroscopia, medicina, industria, comunicaciones ópticas, almacenamiento de datos.

(*) R. Weigand, "Láseres", en: *Óptica Avanzada*, Editorial Ariel, Barcelona, 2007, capítulo 8.

Propiedades de las fuentes láser

(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

Direccionalidad:

Se expresa en términos del ensanchamiento angular:

$$\delta\theta \sim \frac{\lambda}{d}$$

Láser de He-Ne: 0,1 mrad.

Perfil espacial del haz: Distribución de la intensidad asociada al campo propagado

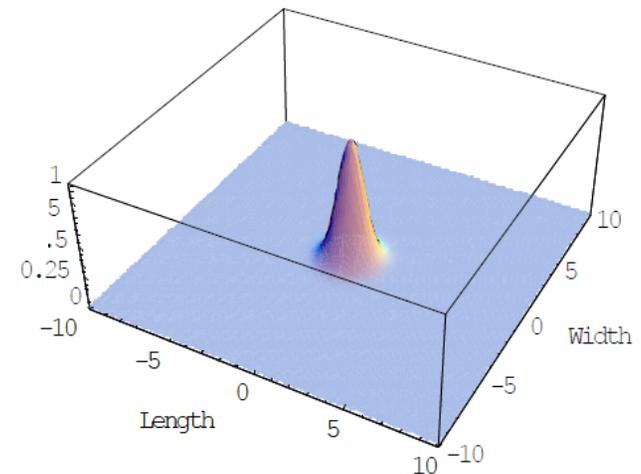
Se expresa como un fenómeno de propagación en el espacio libre de una onda gaussiana.

Se considera la integral de la difracción en régimen de Fresnel. Solución de primer orden para el modo fundamental.

a) Plano $z=0$:

$$\psi(x, y; 0) = A \exp\left[-\frac{(x^2 + y^2)}{w_0^2}\right]$$

b) Plano $z>0$: Función gaussiana con anchura $w(z)$.



La función “cinturón del haz”

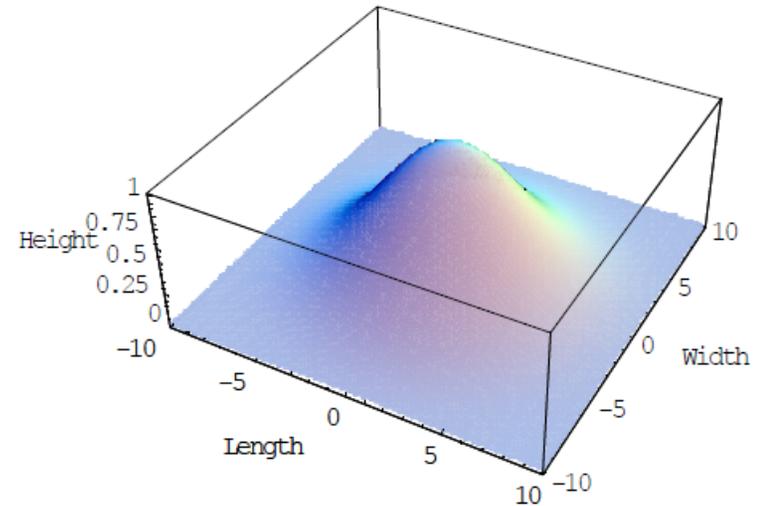
LA FUNCION $\omega(z)$

$$\omega^2(z) = \omega_0^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi \omega_0^2} \right)^2 \right]$$

Radio para el cual la amplitud del haz se amortigua 1/e de su valor máximo.

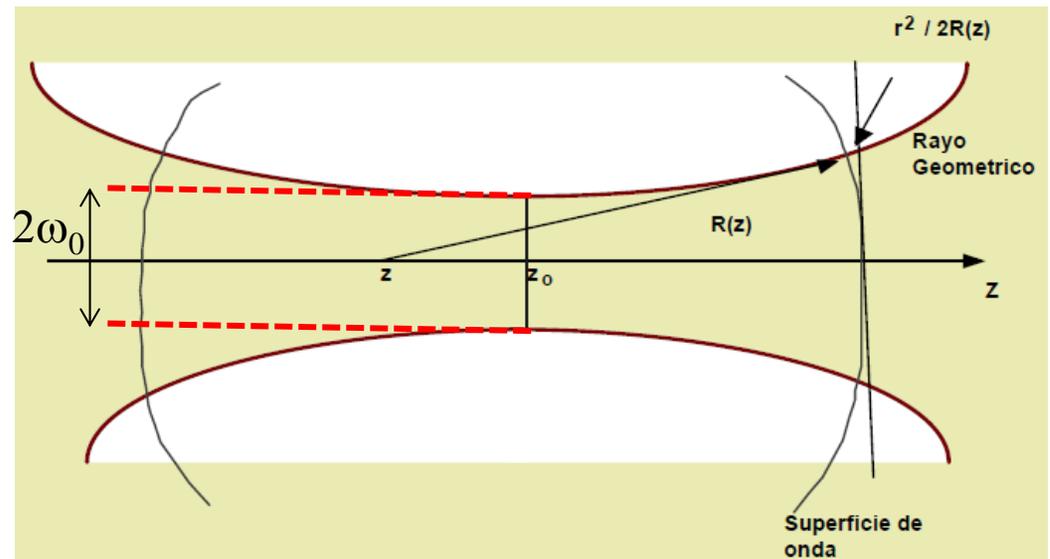
Para: $Z=0$; $\omega(0) = \omega_0$: cinturón del haz

Haz gaussiano propagado una distancia arbitraria Z , $w_0 = 5.0$ mm



ENSANCHAMIENTO DEL HAZ: $2\Delta\theta$

$$\Delta\theta = 2 / k\omega_0 = \lambda / \pi \omega_0$$



Monocromaticidad

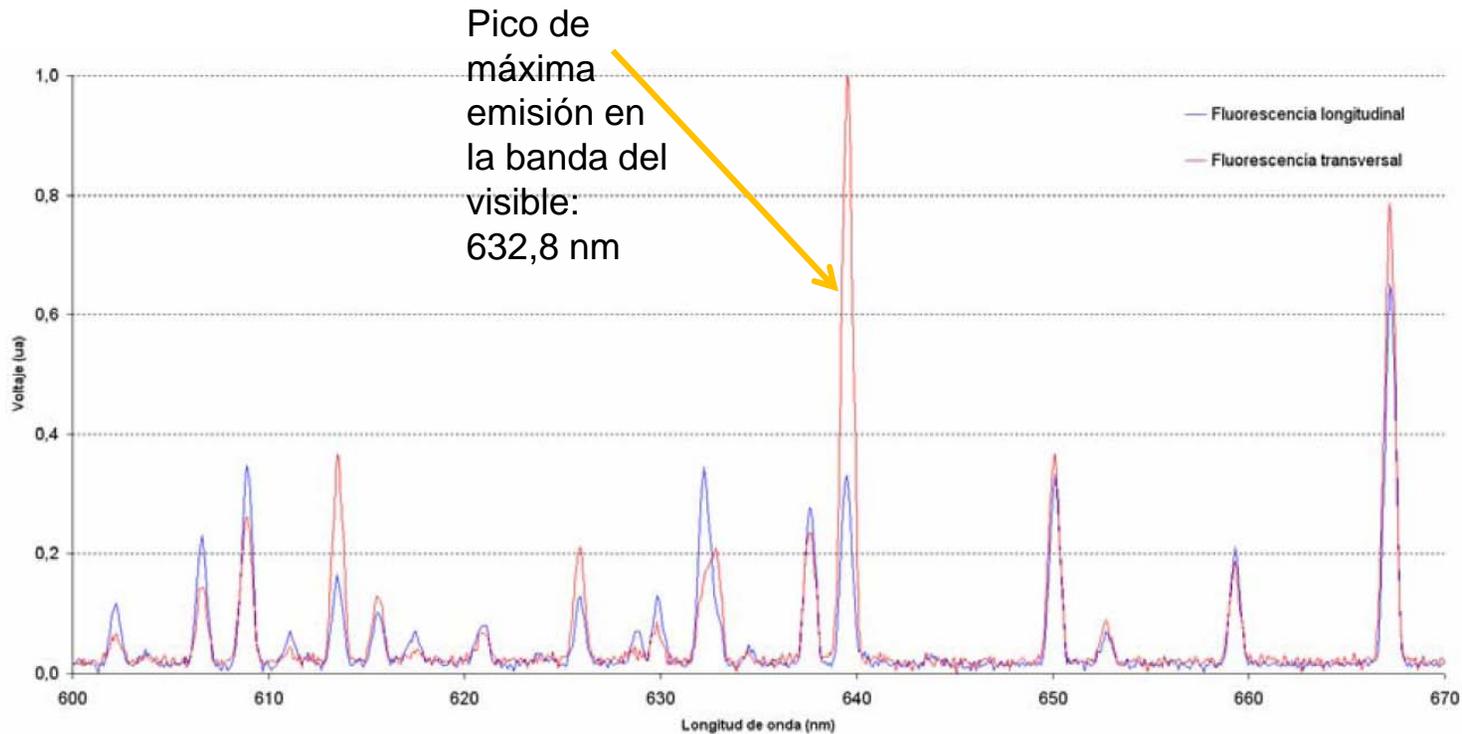
- Se caracteriza por la anchura media del espectro de la señal luminosa.
- El láser en régimen de emisión monomodo es una señal de *banda estrecha*.

$$u(t) = S \cos(2\pi\nu_0 t - \phi)$$

$\Delta\nu$ comprendido entre 1 MHz – 1 GHz

- Frecuencia de emisión del orden de 10^{14} Hz.

Espectro de emisión de un láser de He-Ne



Resultados experimentales comparativos para los espectros de emisión espontánea longitudinal y transversal obtenidos para la banda óptica del visible (*). El láser de He-Ne es una fuente cuasi-monocromática.

(*). C. Lavieja Belanche, Universidad de Zaragoza, 2009.

Normas internacionales para el empleo de láseres (IEC 60825)

- Las normas para la utilización de fuentes láser se establecen en base a la peligrosidad para el ser humano:

1. Sistema visual:

Exposición instantánea a haces láser de alta potencia producen quemaduras en los tejidos oculares, incluida la retina. La exposición repetida puede producir opacidad en la córnea y el cristalino o bien cataratas.

2. Piel. Tejido epitelial

Exposición instantánea a haces de alta potencia. Exposición continuada a haces láser, en general, produce quemaduras en la piel. En el rango: 290-320 nm, UV, puede producir reacciones de carcinogénesis. Potencia: del orden de 1W.

3. Productos químicos en la composición de la fuente

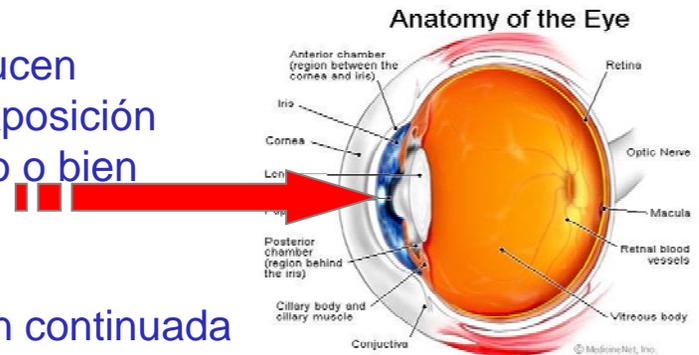
Algunos láseres utilizan sustancias tóxicas en su sistema operativo. Por ejemplo: láser de colorantes. Rodamina G6 categorizada como tóxica. Rodamina B está categorizada como cancerígena.

4. Sistemas eléctricos

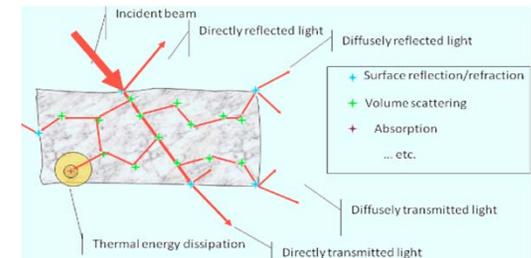
Algunos láseres utilizan para su funcionamiento sistemas eléctricos de alto voltaje que pueden ser letales.

5. Productos inflamables

Algunos láseres utilizan en la composición de la cavidad productos inflamables susceptibles de producir accidentes por ignición (haz directo, reflejado, láseres en IR).



Interacción con tejido epitelial



http://www.photobiology.info/Photomed_files/fig4.png

Ley de Beer-Lambert

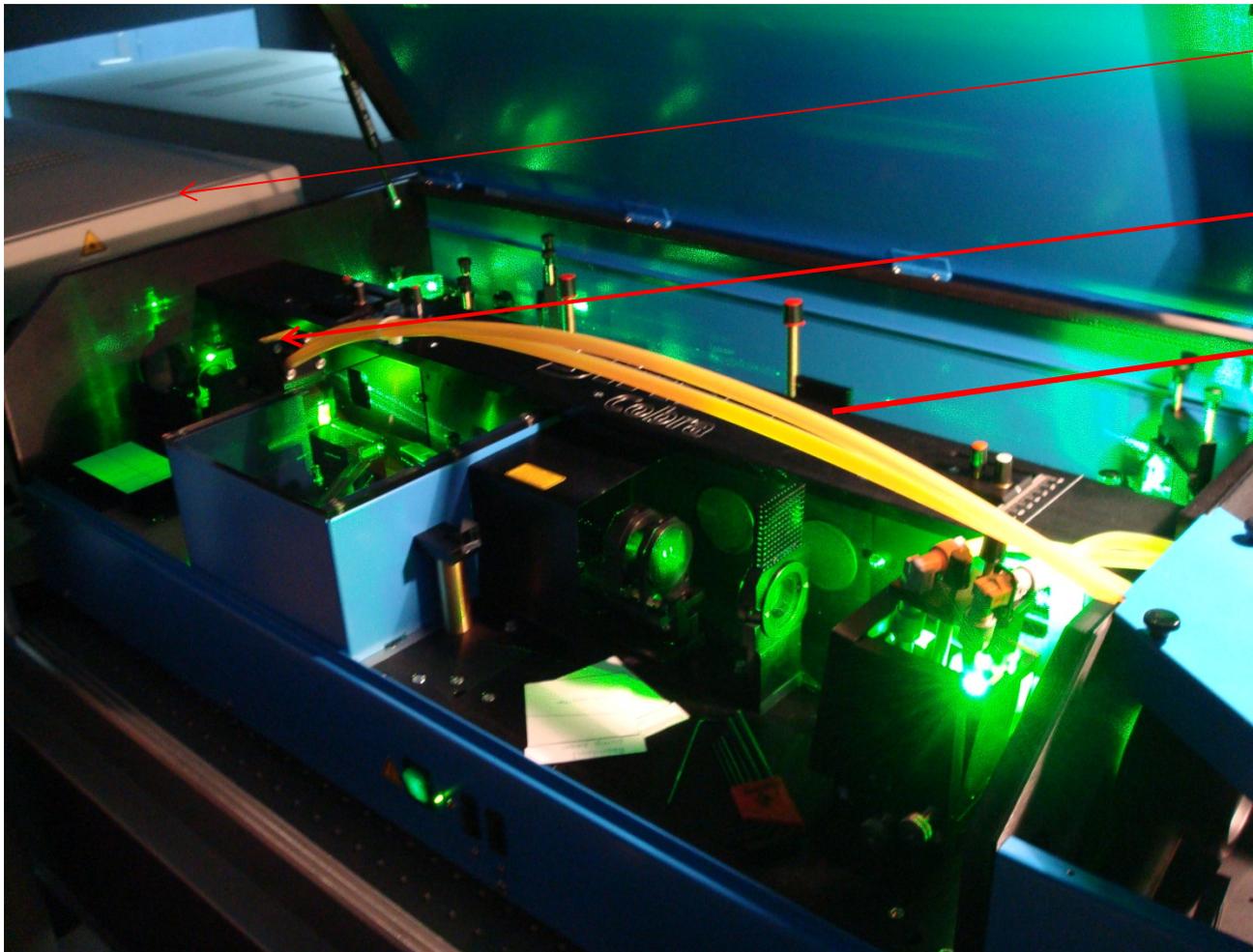
$$I_t(\lambda_x) = I_0(\lambda_x) e^{-\alpha L}$$

Clasificación de láseres

- **Clase I:** se refiere a sistemas que poseen emisores suficientemente resguardados como para que nadie se exponga a emisiones láser, en condiciones normales de utilización.
- **Clase II y IIIa:** no son láseres de uso común. Son equipos que pueden causar daños si se mira directamente a la fuente de emisión.
- **Clase IIIb:** Se refiere a sistemas similares a los de Clase IIIa pero de mayor potencia. En esta clase se consideran, por ejemplo, los equipos láser para comunicaciones ópticas.
- **Clase IV:** Se refiere a sistemas de potencia muy alta, utilizados para usos muy específicos (ejemplo, cirugía láser, ablación láser, limpieza de fachadas). Con potencias del orden de 1W o más (pueden ir hasta 400 W).



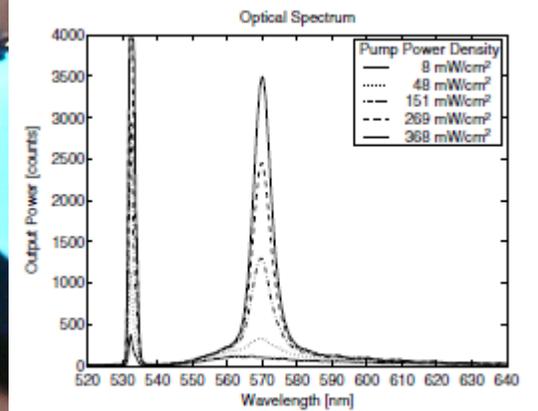
Algunos ejemplos: láser de colorante (*)



Láser de bombeo Nd:YAG

Cubeta con colorante

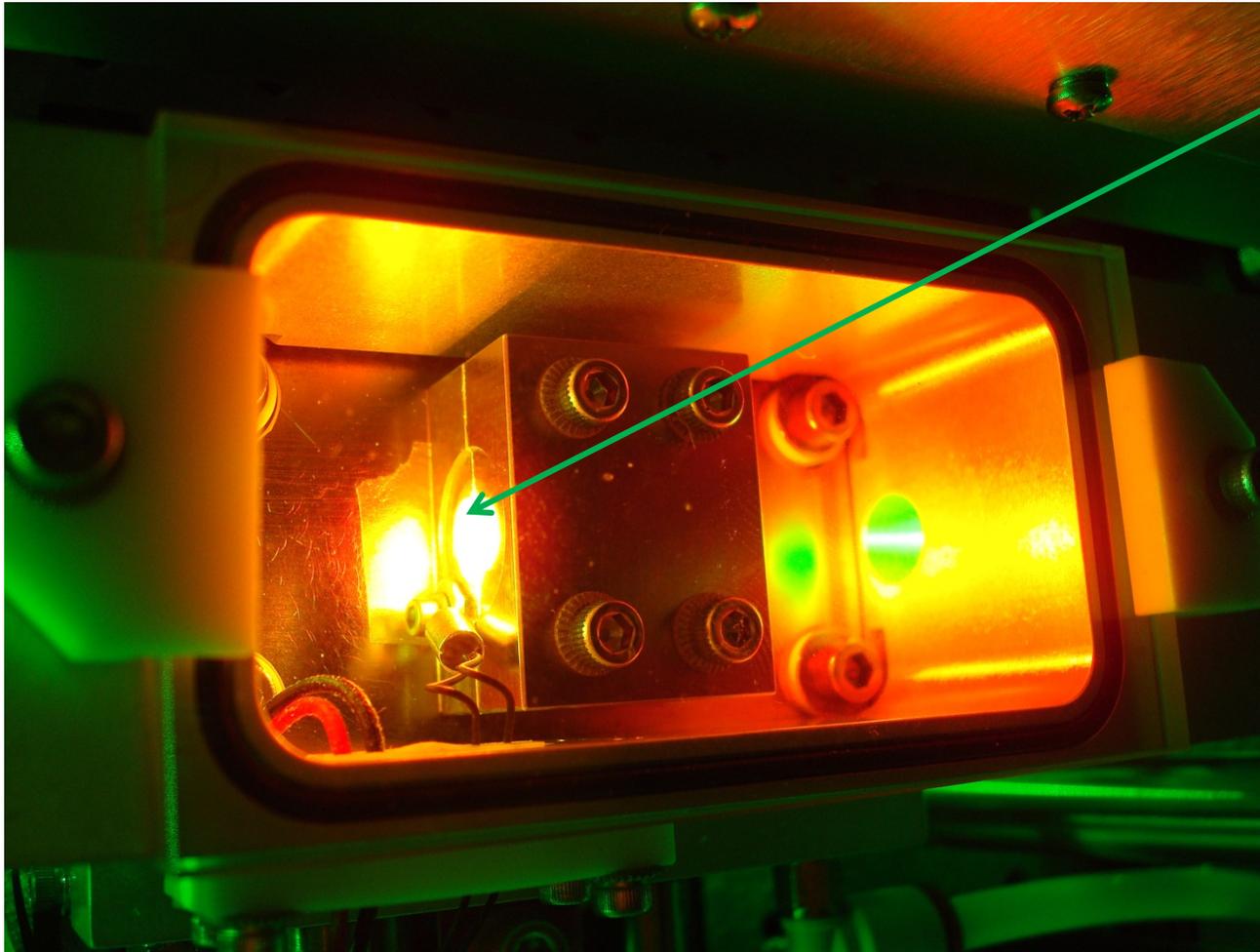
Circuito del colorante



Líneas espectrales

(*) J. González-Izquierdo, Centro de láseres de femtosegundos, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Complutense de Madrid.

Algunos ejemplos: láser de Ti:Zafiro (*)



Barra del
amplificador

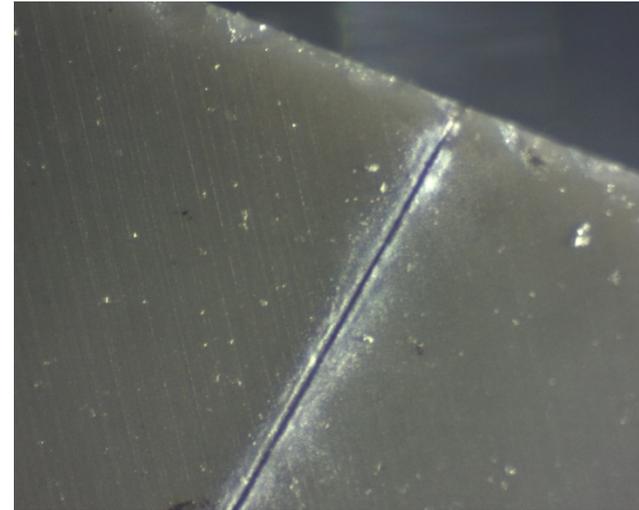
Características:

- Clase IV
- Emisión en 400nm, 800 nm, 1200 nm.
- Pulsos: 35-120 fs.
- Frecuencia: 1KHz.
- Energía: 3,6 mJ.
- FWHM: 6 mm.

(*) J. González-Izquierdo, Centro de láseres de femtosegundos, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Complutense de Madrid.

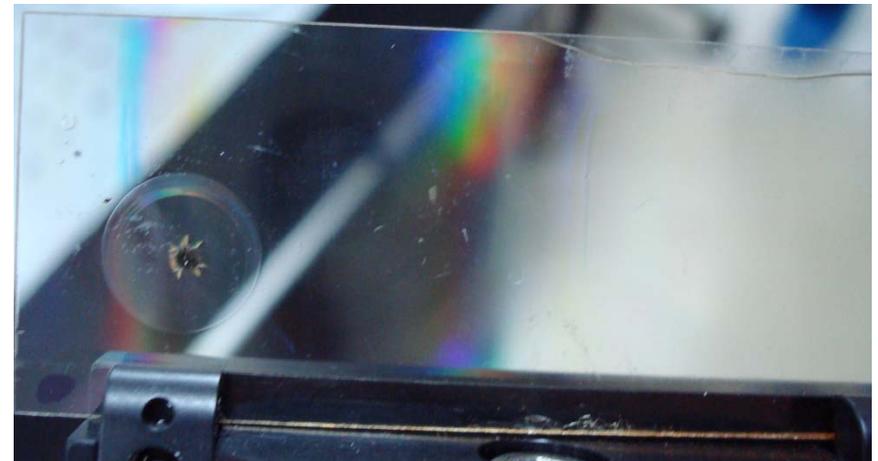
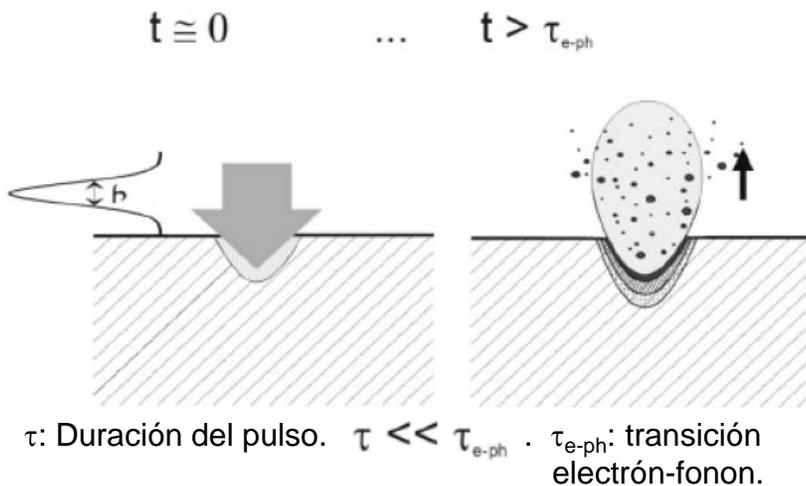
Interacción del láser de Ti:zafiro con la materia

Ablación láser (Pulse Laser Deposition PLD) (*):



Producción de muescas en lámina de Si_3N_4 . Punto de fusión: $1800\text{ }^\circ\text{C}$.

Formación de una pluma plasmónica en la superficie de una lámina de TiO_2 irradiada con un pulso de 35 fs. y potencia 300 mW, en vacío.



Daños producidos en material holográfico vidrio fotopolímero. La estructura resiste después de 10^7 pulsos de irradiación (**).

(**) M. P. Hernández-Garay et al., Opt. Express, **19**, 1516-1527 (2011).



**Muchas gracias por su
amable atención**