

## Láseres de pulsos ultracortos y algunas de sus aplicaciones

L. An y E. Barbosa

Centro Internacional de Física y Universidad Nacional de Colombia

(recibido el 30 de octubre de 1986; aceptado el 28 de enero de 1987)

**Resumen.** Se analiza el progreso en las mediciones de pequeños intervalos de tiempo en los últimos cuatrocientos años. La disminución del mínimo intervalo del tiempo susceptible de medir en diferentes épocas, está íntimamente ligado al desarrollo de la mecánica, la óptica y la electricidad, alcanzando su mejor expresión:  $10^{-14}$  segundos, con el desarrollo de la óptica cuántica y la creación de los generadores cuánticos de la luz: *láser*. El récord de los pulsos ultracortos se ha obtenido con láseres de colorantes, trabajando en un régimen de sincronización pasiva de modos.

La duración de los pulsos generados puede ser muy próxima al límite teórico posible ( $10^{-15}$  segundos en la región visible). Se esquematiza un láser de este tipo que genera pulsos de duración 0.5 picosegundos (1 picoseg =  $10^{-12}$  seg) y se muestra el esquema de amplificación mediante el cual se pueden obtener pulsos con potencias del orden de gigawatios ( $10^9$  w) y se analiza la posibilidad de aplicación de pulsos picosegundos en reacciones bioquímicas selectivas.

**Abstract.** The progress in the measurement of short time intervals over the past 400 years are analyzed. The measurement of the shortest time interval has been closely related to the *state of art* in mechanical, optical and electrical sciences in every period of science development.

The best score of  $10^{-14}$  sec was made possible with the development of Quantum Optics and the construction of the lasers. Dye lasers working in the passively mode-locked were used for the first time to record the shortest pulses. The pulse length has reached approximately the possible theoretical limit ( $10^{-15}$  sec in the visible region). Picosecond light pulse generation in mode-locked dye laser is summarized and it is shown the schema of high-power amplification wich allows to achieve gigawatt optical intensities.

Some possibilities of picosecond light pulses application in Photobiochemistry are discussed.

PACS: 42.60.-; 42.55.M-

## 1. Introducción

La medición del tiempo es una parte inherente de la cultura y está muy ligada al progreso de la ciencia y la técnica. Históricamente hablando, el perfeccionamiento de los medios y métodos de medición del tiempo no se ha realizado por sí mismo, sino bajo las exigencias de exactitud requeridas en diversos niveles de desarrollo de la cultura y la civilización. A medida que han aumentado dichos niveles de desarrollo, han crecido también las exigencias de exactitud en las mediciones y por consiguiente en la perfección de la técnica de medición del tiempo.

Así pues, la utilización de los avances de la ciencia y la técnica han alcanzado cada vez mayor significado; sin este factor adicional el continuo perfeccionamiento de los instrumentos y métodos de medición del tiempo sería imposible.

Veamos cuál ha sido el progreso en las mediciones de pequeños intervalos de tiempo en los últimos cuatrocientos años, el cual se puede representar muy esquemáticamente en el gráfico mostrado en la Fig. 1 [1].

Aunque este gráfico es, por supuesto, bastante aproximado, se pueden notar en él algunos hechos de importancia.

En el año 1600, el intervalo de tiempo más corto que podía medirse era un segundo. Posiblemente este límite se alcanzó gracias al invento, alrededor de esta época, de los relojes mecánicos. Después del año 1600, durante casi 150 años no se observaron cambios notables en el límite de las mediciones de tiempo y hacia el año 1750, la frontera se había corrido únicamente en un orden de magnitud, alcanzando  $10^{-1}$  segundos.

Después de 1750, se observa un rápido avance hacia la disminución del orden de magnitud de las mediciones de tiempo, re-

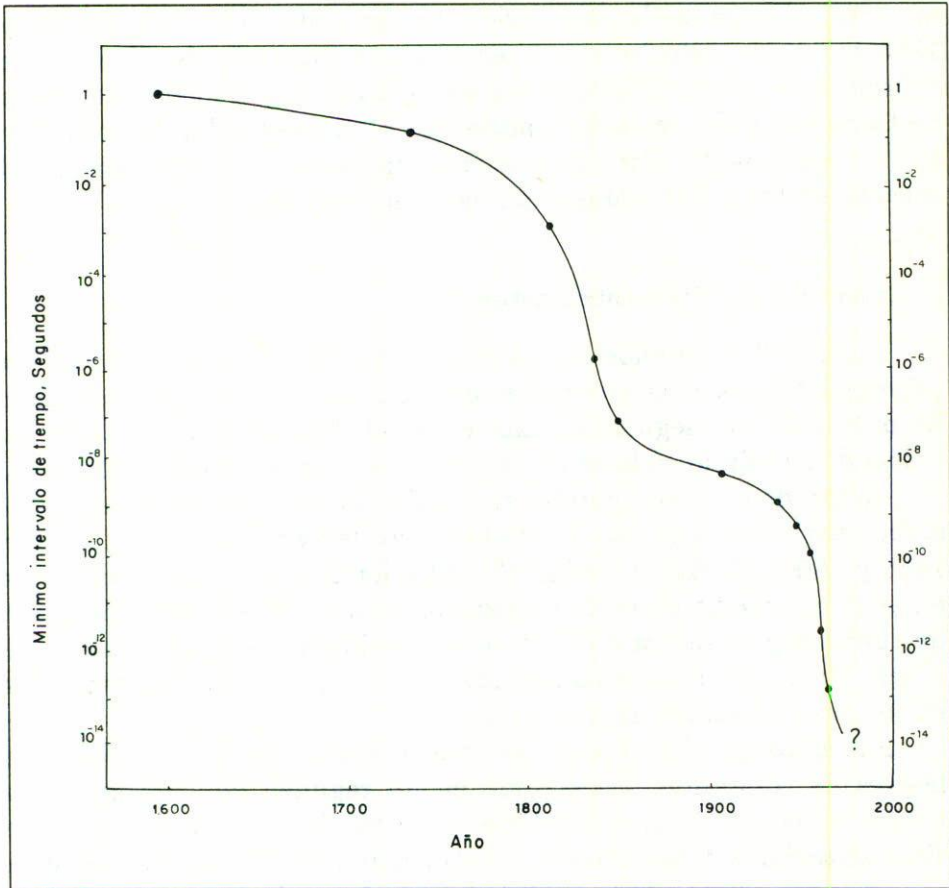


FIGURA 1. Representación esquemática del progreso en la medición de intervalos cortos de tiempo [1].

duciéndose en 6 órdenes de magnitud en el transcurso de un siglo, llegando hasta los  $10^{-7}$  segundos. Este éxito alcanzado se debió al desarrollo de la óptica y a la utilización de los primeros aparatos eléctricos.

Desde 1850 hasta 1950 el límite alcanzado se logró correr únicamente en dos órdenes de magnitud, llegando a  $10^{-9}$  segundos en

los años cincuenta de este siglo. Aproximadamente entre 1965 y 1975 hubo un salto brusco, y en el corto intervalo de 10 años, se sobrepasó el límite de los picosegundos llegándose a medir intervalos de tiempo con duraciones menores que el picosegundo, del orden de  $10^{-14}$  segundos [2]. Este gran acontecimiento fue posible gracias al invento de los generadores cuánticos del tipo "láser".

## 2. Láseres de pulsos ultracortos

Durante los 10 años mencionados anteriormente se crearon los principales tipos de láseres que se utilizan hoy en día en la generación de pulsos de picosegundos, tales como el láser de rubí, el láser en vidrio de neodimio, el láser de vidrio YAG y los láseres de colorantes.

La era de los picosegundos se inició utilizando un láser de medio sólido con sincronización de modos. Este láser fue construido entre 1965 y 1966. Mocker y Collins [3] obtuvieron pulso de picosegundos en 1965 por medio de la sincronización pasiva de los modos del láser de rubí, originando un régimen de operación de pulsos gigantes. De Marie [4], en 1966, obtuvo por primera vez pulsos de picosegundos en un láser de vidrio de neodimio.

Sin embargo el récord de los pulsos cortos, se ha obtenido con láseres de colorantes, trabajando en un régimen de sincronización activa o pasiva de modos. Para la obtención de un régimen de sincronización activa de modos se utiliza un modular optoacústico en el resonador interno. Este modulador puede ser de disipación, de fase (*Q-switch*), etc. También se puede utilizar el bombeo sincronizado con pulsos ultracortos de un láser potente de medio sólido o un láser de iones con modos sincronizados. En este caso, las longitudes ópticas del láser en el colorante y del láser con modos sincronizados que se utiliza para el bombeo, deben estar en concordancia. Mediante el bombeo sincronizado con un láser de argón se obtuvieron en un láser que utiliza como medio activo una solución del colorante rodamina 6G (RH6G), pulsos estabiizados con duración aproximada de 7 picosegundos. La longitud de onda de la radiación se podía variar entre 565 y 625 nanómetros.

Un pulso más corto, de duración aproximada de 3 picosegundos, en un medio láser que era una solución de RH6G, fue obtenido por Fan y Gustafson en 1976 [5] mediante bombeo con un láser de neodimio; la duración del pulso fue de 5 picosegundos.

Pero los láseres de mayor perspectiva, desde el punto de vista de la obtención de pulsos luminosos ultracortos, son los láseres de colorantes con sincronización pasiva de modos. La duración de los pulsos generados puede ser muy próxima al límite teórico posible y sólo está condicionada por el principio de incertidumbre (en la región visible es igual a  $10^{-15}$  segundos). En 1979, en el Instituto de Espectroscopía de la Academia de Ciencia de la Unión Soviética, se construyó un láser cuyos pulsos tenían una duración de  $10^{-12}$  segundos.

Un láser de este tipo, se puede representar en el esquema que se muestra en la Fig. 2. En dicha figura se tiene un resonador de tres espejos (un espejo adicional a los dos que constituyen normalmente la cavidad de un láser). El espesor del flujo del colorante y el ángulo de "quebre" del resonador se escogen de tal manera que el astigmatismo que introduce el flujo de colorante, se compense con el astigmatismo que introduce el espejo. Los radios de curvatura de los espejos son  $R_1 = R_2 = R_3 = 5$  cm. Se utiliza un espejo de salida con transparencia del 6% en la longitud de onda emitida por este láser.

El bombeo se realiza con un láser de argón de longitud de onda igual a 514.1 nanómetros. El tiempo que dura el viaje de la luz a través del resonador en las dos direcciones es de 6 nanosegundos (la longitud del resonador es de un metro aproximadamente). La velocidad del flujo del colorante RH6G disuelto en etilenglicol es de 12 m/seg. Como absorbente de saturación se utiliza DODCI (yodato de 3,3 dietiloxadicarboxianina) en el mismo jet de RH6G. La potencia de salida promedio es de 15 mW para pulsos de duración 0.5 picosegundos; la potencia pico es de 300 W aproximadamente). La duración de los pulsos se puede medir por medio de la generación de armónicos secundarios, suponiendo pulsos de forma gaussiana.

Para la amplificación de los pulsos se utiliza un amplificador de tres celdas en el colorante RH6G como se muestra en la Fig. 3.

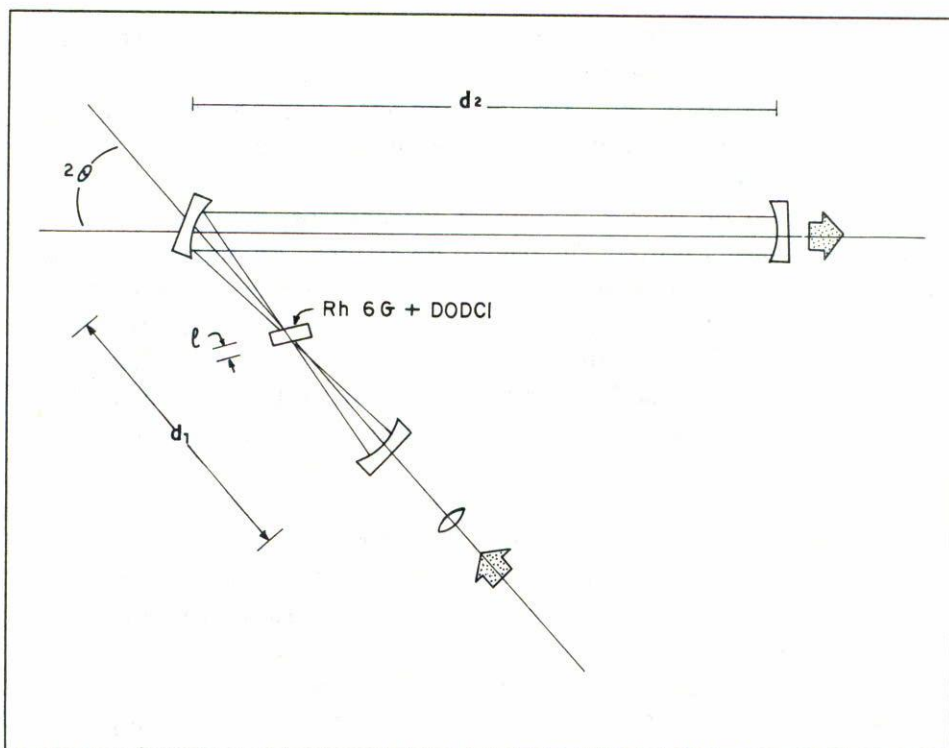


FIGURA 2. Esquema óptico de un láser de colorante.

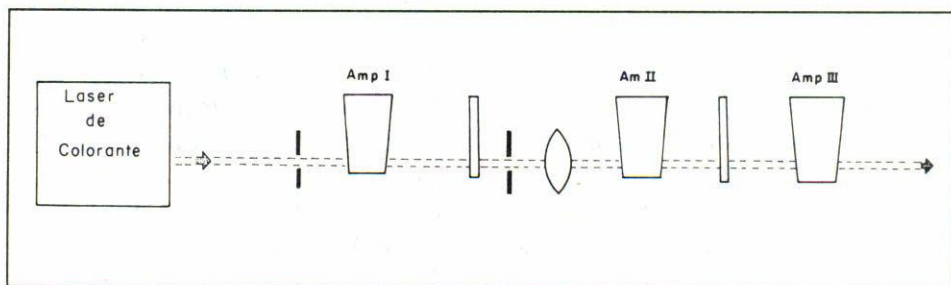


FIGURA 3. Esquema óptico de los amplificadores de pulsos ultracortos.

Los dos primeros amplificadores están constituidos por una cubeta con colorante, cuyo diámetro es de 10 mm. El bombeo longitudinal es producido por un láser de colorante. La superficie del haz, antes de entrar al segundo amplificador se disminuye hasta 3 mm<sup>2</sup>. Como desacoplador se utiliza una solución con los respectivos absorbentes. El tercer amplificador tiene un diámetro de 5 mm. Este sistema permite obtener pulsos de potencia de megawatios (3 MW). Si se utiliza un láser de neodimio (la segunda armónica es de 530 nanómetros) como láser de bombeo, se pueden obtener pulsos con potencias del orden de gigawatios (10<sup>9</sup> W) utilizando un obturador electro-óptico, amplificando de esta manera pulsos individuales.

### **3. Algunas aplicaciones**

Gracias a las propiedades especiales de la radiación láser, aparecieron nuevos campos de investigación que hoy en día se desarrollan muy activamente, como son la óptica no-lineal, la física de los pulsos ultracortos y la holografía. Vamos a detenernos ligeramente en la física y aplicación de los pulsos ultracortos.

La aplicación de los láseres de picosegundos en las investigaciones físicas, químicas y biológicas, conllevó una revolución en el estudio de los procesos ultrarrápidos [6]. Por ejemplo, en los últimos años se han escrito reportes acerca de muchos experimentos en los que se utilizan pulsos de picosegundos para mediciones de tiempo directas en procesos con una relajación muy rápida; tales como la duración del proceso de desfase de algunas oscilaciones moleculares [7,8,9].

La aplicación de la técnica de los picosegundos en las investigaciones de muestras biológicas tiene una serie de ventajas. En primer lugar, la transmisión de energía en las moléculas complejas ocurre en un intervalo de tiempo del orden de picosegundos. El número de posibles formas de excitación es muy grande, siendo igualmente muy grande el número de canales de transformación de la energía. En segundo lugar, la reubicación de los átomos, moléculas o cadenas laterales de macromoléculas como fenómeno fundamental del proceso biológico, se realiza en un intervalo de tiempo del orden de

los picosegundos. Por consiguiente, actualmente despierta un gran interés en los científicos la acción selectiva de los pulsos del láser en los procesos biológicos [10].

Letokhov analizó la posibilidad de las reacciones bioquímicas selectivas, inducidas por la radiación láser y llegó a la conclusión de que para este efecto es necesaria la técnica de los pulsos de picosegundos. Puesto que los niveles electrónicos de absorción en las macromoléculas biofísicas tienen un ancho de unos centenares de angstroms, en cualquier esquema de acción selectiva, es necesario excitar selectivamente niveles oscilatorios específicos, y estos niveles deben ser suficientemente angostos para que se pueda realizar la absorción selectiva. Además de lo anterior, la selección se debe conservar, aun después de la excitación, en los procesos físicos y químicos subsiguientes.

Letokhov propuso dos esquemas que se muestran en las Figs. 4 y 5 [11].

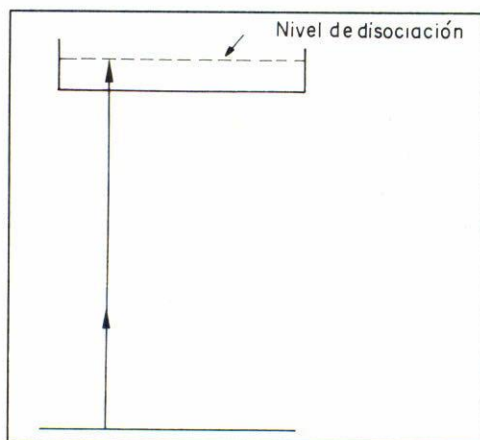


FIGURA 4. Excitación selectiva de las moléculas por medio de los pulsos de radiación infrarroja, acompañadas de pulsos en el rango visible, que conlleva a la disociación, únicamente de las moléculas excitadas.

Al excitar las moléculas de una solución, a los esquemas anteriores se les imponen ciertas condiciones. Por ejemplo, en la fase líquida, el tiempo característico de la desexcitación de las oscilaciones, por lo general es del orden de 10 picosegundos. Por eso, para impedir la desexcitación no-selectiva de los niveles oscilatorios por relajación



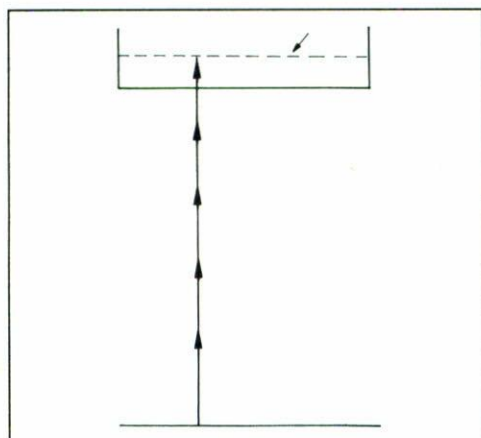


FIGURA 5. Excitación polifotónica con pulsos infrarrojos en las escalas de los niveles oscilatorios que también produce disociación.

térmica, la energía se debe introducir en pulsos ultracortos. En el primer esquema los dos pulsos deben introducir suficiente energía hasta que comience la relajación oscilatoria.

En el caso del ADN se requiere una potencia de  $3 \times 10^9$  W/cm<sup>2</sup> en cada pulso. Además de esto, los pulsos deben estar sincronizados dentro de los límites de tiempo de la relajación oscilatoria.

En el segundo esquema, de excitación polifotónica infrarroja, la energía debe darse a la muestra en un tiempo menor que el tiempo de desfase. Esta condición es más rígida que la anterior ya que el tiempo de desfase por lo general es mucho más corto que el tiempo característico de la relajación oscilatoria de las moléculas en la solución.

Letokhov señala que la excitación selectiva podría utilizarse como método de desdoblamiento estimulado de la espiral doble del ADN. Algunas transiciones, como la de  $1700$  cm<sup>-1</sup> y  $1720$  cm<sup>-1</sup>, corresponden a los enlaces del hidrógeno entre la adenina y tiamina, y la guanina y citocina, respectivamente.

Estas transiciones pueden ser producidas mediante pulsos de luz infrarroja con frecuencia igual a la frecuencia de las transiciones, y de esta manera, se podrían romper los enlaces y desdoblar la molécula de ADN. También se puede actuar selectivamente en el radical (re-

sidual) fosfato PO. Para esto es necesario generar radiación intensa de 8,13 micrómetros ya que el grupo PO tiene una resonancia en  $1230 \text{ cm}^{-1}$ .

Estos dos esquemas de excitación selectiva tienen gran perspectiva y en los momentos actuales ya se tienen resultados notables [12].

## Referencias

1. S.L. Shapiro, en "Ultrashort light pulses" p. 25, Springer Verlag (1977).
2. Conference on Lasers and Electrooptics, 1982-Technical Digest Washington, p. 32 (USA).
3. H.W. Mocker, R.J. Collins, *Appl. Phys. Lett.* **7** (1965) 270.
4. A. De Marie, D.A.J. Stetser, H. Heynau, *Appl. Phys. Lett.* **8** (1966) 174.
5. B. Fan, T.K. Gustafson, *Appl. Phys. Lett.* **8** (1976) 174.
6. S.A. Akhmanov, N.I. Koroteev, *Naturaleza* **7** (1976) (en ruso).
7. A. Laubereau, G. Wochner, W. Kaiser, *Phys. Rev. A* **13** (1976) 2212.
8. D. von der Linde, A. Laubereau, W. Kaiser, *Phys. Rev. Lett.* **26** (1971) 954.
9. B. Greene, R. Farrow, *Laser Focus*, **19**(2) (1983) 22.
10. V.S. Letokhov, *J. Photochem.* **4** (1975) 185.
11. V.S. Letokhov, *Electrónica Cuántica* **1** (1975) 930 (en ruso).
12. V.A. Shuvalov, A.V. Klevanik, A.V. Sharkov, Y.A. Matveetz, P.G. Krukov, *Dokladi Akademii Nauk (Trabajos de la Academia de Ciencias de la URSS)* **243** (1978) 1072 (en ruso).