

## Láseres de N<sub>2</sub> para fines didácticos

M. VILLAGRÁN M.

*Laboratorio de Óptica Aplicada, CIUNAM  
Apartado postal 70-186, 04510 México, D.F., México*

M. ARGOTE C. Y C. DOMÍNGUEZ-TAGLE P.

*Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México  
Apartado postal 70-542, 04510 México, D.F., México*

Recibido el 4 de abril de 1994; aceptado el 12 de septiembre de 1994

**RESUMEN.** Se presenta el diseño, construcción y parametrización de láseres de nitrógeno económicos y fáciles de instrumentar por estudiantes sin experiencia previa. Los láseres son de descarga transversal, a presión atmosférica, con circuito Blumlein de excitación y emiten en forma pulsada (ns) en la región ultravioleta del espectro ( $\lambda = 337.1$  nm). Se discuten aplicaciones didácticas de estos láseres que se pueden construir a muy bajo costo.

**ABSTRACT.** This work presents the design, construction and parameterization of Nitrogen lasers, which are easy to build by undergraduate students. These are transversal discharge lasers at atmospheric pressure (TEA), excited by a Blumlein circuit, emitting nanosecond pulses in the ultraviolet region of the spectrum ( $\lambda = 337.1$  nm). Didactical applications of these low cost lasers are discussed.

PACS: 01.50.Pa; 42.60.-v; 42.60.By

### 1. INTRODUCCIÓN

Los primeros láseres fueron construidos hace más de 30 años y es desde hace una década que son masivamente conocidos y de uso común en metrología, aplicaciones médicas, comunicaciones, lectores de barras, discos compactos, entretenimiento, etc. Por tal motivo, una gran cantidad de estudiantes acuden a los laboratorios de investigación y enseñanza interesados en la construcción de láseres y sus aplicaciones. Debido a que gran parte de las experiencias de enseñanza en óptica se realizan con la ayuda de los conocidos láseres de HeNe, el interés de los estudiantes se centra básicamente en ellos. Estos son relativamente económicos (200 USD) pero difíciles de construir, ya que el tubo de descarga contiene soldaduras vidrio-metal y diseños de electrodos complicados. Si el interés es sólo armar un láser de este tipo, conviene comprar el tubo que incluye los espejos que forman la cavidad óptica, para luego construir la fuente de poder que típicamente es de 1.5 kV, 4 mA para un láser de 1 mW. Los láseres de HeNe tienen la ventaja de ser visibles (632.8 nm), continuos, intensos y de larga vida.

Por otro lado, los láseres de semiconductor emitiendo en 670 nm, recientemente son accesibles a precios aun inferiores (100 USD) a los láseres de HeNe. Estos láseres son muy eficientes, pequeños y están reemplazando en muchas aplicaciones a los de HeNe.

Pero en los láseres de semiconductor como elemento didáctico, debido a su construcción monolítica, es difícil cambiar sus características para comprender su construcción y funcionamiento.

Para aquellos estudiantes que no se conforman con armar o comprar los láseres y quieren construirlos ellos mismos, se han desarrollado láseres de  $N_2$ , que si bien emiten en el ultravioleta en forma pulsada, no se necesita de detectores especiales para verlos. Su construcción es relativamente simple, rápida, compacta y económica con componentes de fácil adquisición y contienen varios elementos de física sobre descargas gaseosas y de ingeniería en las consideraciones de diseño para su estudio y comprensión.

El láser que aquí se presenta fue construido con la idea de hacerlo lo más simple y económico posible para que pueda ser reproducido por estudiantes sin experiencia previa en laboratorios de enseñanza a nivel medio y superior. Se describe la forma de construirlo, su modo de operación y además se proponen algunas experiencias didácticas para entender el funcionamiento de lo que es el medio activo de un láser, la fuente de excitación y las cavidades ópticas. Se presenta también la parametrización de este tipo de láseres realizando las medidas ópticas y eléctricas y se proponen diferentes posibilidades en la construcción de nuevos diseños para mejorar su eficiencia.

## 2. LÁSER DE NITRÓGENO

El primer láser de  $N_2$  apareció en la década de los sesentas junto con un gran número de láseres moleculares. De toda la variedad de láseres pulsados que existe, estos son los más fáciles de construir, con un bajo costo de operación y mantenimiento [1]. La desventaja es su baja eficiencia y energía por pulso.

La variedad de aplicaciones que se han cubierto con los láseres de  $N_2$  es enorme: excitación de láseres de colorantes, espectroscopía, fotoquímica, fluorescencia inducida por láser resuelta en tiempo, diagnóstico de plasmas, fotografía de alta velocidad, etc. [2]. La teoría de operación de los mismos y las consideraciones de diseño pueden encontrarse en los trabajos de Ali [3,4].

Todo láser consta de tres partes fundamentales: el medio amplificador o medio activo, la fuente de excitación y la cavidad óptica. En nuestro caso, el medio activo es el nitrógeno contenido en la cámara de descarga. La fuente junto con un circuito de excitación, generan una descarga eléctrica pulsada de alta tensión que excita el gas. Con respecto a la cavidad óptica que produce la retroalimentación del amplificador, en los láseres de  $N_2$  ésta no es estrictamente necesaria debido a la alta ganancia del medio activo.

La descarga puede ser axial o transversal, es decir, dependiendo de la configuración de los electrodos y, por lo tanto, del campo eléctrico, la emisión puede tener una dirección igual a la del campo (axial), o perpendicular al mismo (transversal o de campo cruzado).

Los láseres de  $N_2$  pueden trabajar a diversas presiones desde 0.03 a una atmósfera, obteniéndose pulsos con anchos de 10 ns a 20 Torr hasta 300 ps a presión atmosférica, con frecuencias de repetición típicas de 1 a 100 Hz.

Los láseres de  $N_2$  de baja presión, simples y económicos para ser construidos por estudiantes sin experiencia previa, han sido desarrollados y patentados por Small [5].

Se centrará la atención en los láseres de  $N_2$  que trabajan a presión atmosférica con

descargas de campo cruzado (*transversely excited atmospheric —TEA—*). A pesar de que su eficiencia es menor que la de los láseres de baja presión [6,7], no es necesario el uso de equipos de vacío, lo que hace más económica y simple su construcción. Cabe aclarar que en estos láseres se continúa haciendo investigación y en su desarrollo se plantea mejorar la eficiencia [8].

### 3. MECANISMO DE EXCITACIÓN

Las moléculas de nitrógeno son excitadas por los electrones generados en una descarga eléctrica pulsada, produciendo emisión principalmente en el segundo sistema positivo ( $C^3\pi_u - B_g^3$ ) en la banda centrada en 337.1 nm.

Los electrones excitan el nivel láser superior de la molécula por impacto electrónico directo, produciendo la inversión de población. Esta inversión es transitoria (láser pulsado) debido a que el tiempo de vida del nivel inferior (10  $\mu$  s) es mayor que la del nivel superior (47 ns). Dado lo anterior, el pulso de tensión y corriente aplicado al gas deben tener un tiempo de crecida (*rise time*) corto. Estas condiciones se obtienen descargando capacitores rápidamente gracias a una optimización de las líneas de transmisión del circuito de descarga, para lo cual existen diferentes arreglos: el circuito Blumlein, el circuito transferente capacitor (C-a-C) y el circuito Polloni. A continuación se analizará brevemente el primero de ellos, ya que es con éste que funciona el láser construido.

### 4. CIRCUITO BLUMLEIN

Este tipo de circuito fue propuesto por Shipman en 1967 [9] y se esquematiza en la Fig. 1. La manera en la que opera es la siguiente: conforme aumenta el voltaje de carga, ambos capacitores se cargan al mismo potencial y a la misma polaridad. En el momento en que se alcanza el voltaje de ruptura en la llave rápida (*spark-gap*), ésta se cierra poniendo al capacitor C<sub>2</sub> en corto circuito, haciendo que su carga fluya hacia tierra a través de ella. Al mismo tiempo, la bobina L deja de conducir debido al brusco cambio de corriente, impidiendo que el capacitor C<sub>1</sub> también se descargue hacia tierra. De esta manera se establece una alta diferencia de potencial entre los electrodos, produciéndose entonces una descarga de resplandor (*glow discharge*) que excita el volumen de gas.

A pesar de que su eficiencia no supera el 0.8% [7], el circuito Blumlein es muy usado para excitar láseres de N<sub>2</sub> e incluso otro tipo de láseres como son los de excímeros.

### 5. CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN

Se describen a continuación las formas más simples de instrumentar los componentes de este tipo de láseres que se esquematiza en la Fig. 2 y se presenta el proceso de construcción y operación.

Los electrodos son de tubo de aluminio de 6 cm de largo y 6 mm de diámetro, éstos tienen separación variable de 0.1 a 5 mm y están sujetos por tornillos —que permiten

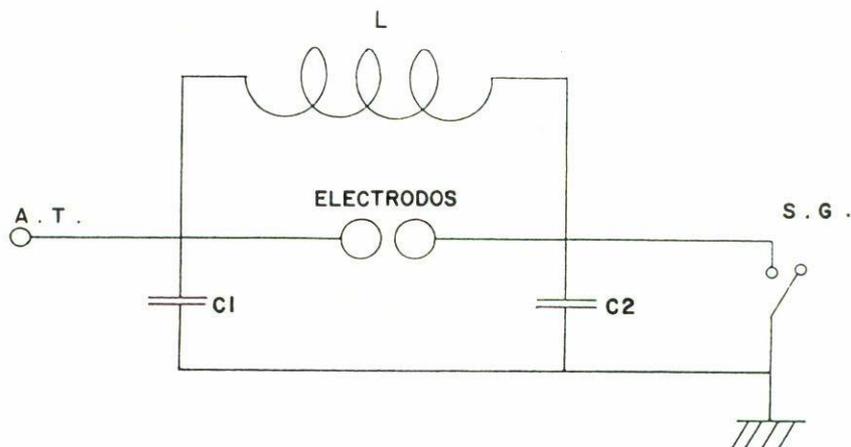


FIGURA 1. Circuito Blumlein.

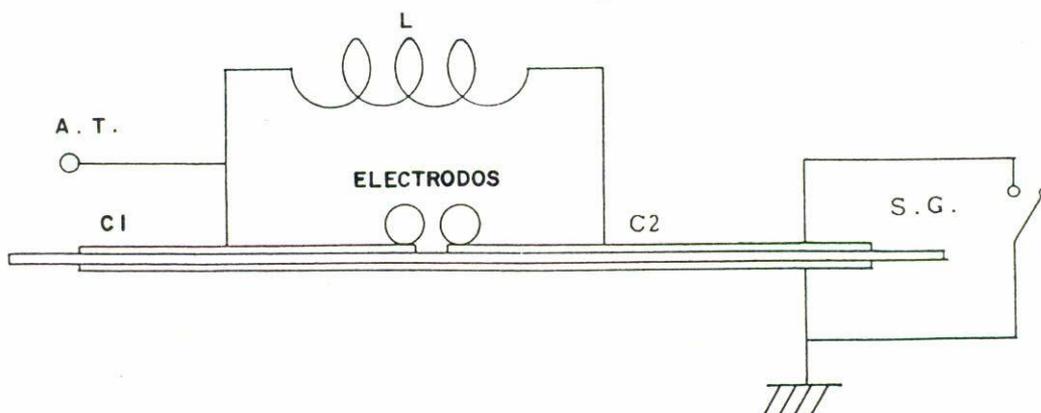


FIGURA 2. Esquema del láser construido.

su alineación para ubicarlos paralelos— a una cámara de acrílico por donde se hace fluir homogéneamente nitrógeno comercial. Si bien se han utilizado electrodos más largos, se recomienda comenzar con los de 6 cm porque se facilita la alineación de los mismos.

Los capacitores planos fueron instrumentados con dos capas de papel aluminio de 12 cm de largo por 6 cm de ancho para la cara de alta tensión y 26 cm por 6 cm para la cara de tierra, separadas por una hoja de Mylar<sup>MR</sup> de 0.18 mm. Se han utilizado capacitores de diferente valor para así someterlos a diversas pruebas en la parametrización del láser, aunque un valor aceptable de la capacitancia puede ser de 1 nF. La cámara (no mostrada en la Fig. 2) junto con los electrodos se apoya sobre los extremos de los capacitores cuidando que hagan un buen contacto.

La inductancia (que tampoco es un parámetro crítico) de 31.8  $\mu\text{H}$ , puede fabricarse con 38 vueltas de alambre AWG#20 sobre núcleo de ferrita de 7 mm de diámetro y 36 mm en su longitud. La llave rápida (*spark-gap*) puede ser construida simplemente con dos

electrodos metálicos con separación variable para poder regular la tensión de carga de los capacitores [5]. La llave sugerida consta de dos electrodos de grafito dentro de una cámara cilíndrica de *nylon* opaco que se separan en forma mecánica. La ventaja de este tipo de llaves consiste en que se evita el ruido acústico y la radiación ultravioleta que produce la descarga. Para una tensión de carga de 10 kV, esta llave ha funcionado sin problemas por más de  $1 \times 10^6$  pulsos trabajando a 20 Hz. Los inconvenientes usuales son el desgaste de los electrodos, por lo que hay que regular su separación periódicamente y, además, luego de un tiempo prolongado de uso, se produce el calentamiento del aire dentro de la cámara que reduce la resistencia provocando una disminución en la tensión de ruptura y, por lo tanto, inestabilidades en la amplitud de los pulsos. Este inconveniente puede ser resuelto haciendo fluir nitrógeno entre los electrodos de la llave.

Con respecto a la fuente de alta tensión que alimenta al circuito de excitación del láser, puede ser construida simplemente con un transformador de alta tensión, rectificado con un puente de diodos y una resistencia limitadora de corriente. La fuente que aquí se describe es de tensión y frecuencia variable esquematizada en la Fig. 3. Está diseñada basándose en un circuito de salida horizontal de un televisor, donde se hace oscilar a un transformador (*fly-back*) a una frecuencia de 15750 Hz, que es establecida por un generador de onda cuadrada alimentado por una fuente rectificada en onda completa tipo bipolar y estabilizada por un regulador de voltaje y un filtro " $\pi$ ". La tensión de salida del transformador es elevada por un multiplicador de voltaje para finalmente aplicar una tensión, sobre los capacitores del circuito Blumlein, variable de 0 a 13.8 Kv. Los componentes de dicho circuito se muestran en la Tabla I.

Con respecto a la cavidad óptica, debido a la alta ganancia de la molécula de N<sub>2</sub> (50 dB/m) no es estrictamente necesario utilizarla. Sin embargo, para aumentar la eficiencia, resulta muy útil colocar un espejo plano de aluminio de primera superficie en uno de los extremos, con lo que se obtiene un incremento del 80% en la energía de los pulsos. Si se desea mejorar la calidad del haz, es necesario un espejo de salida parcialmente reflector, para lo cual es suficiente utilizar el 4% de reflexión de una lámina de cuarzo delgada.

La forma de operación es simple: se hace fluir N<sub>2</sub> por la cámara de descarga y se enciende la fuente de alimentación a una tensión típica de 10 kV. Los electrodos deben estar perfectamente alineados, porque de lo contrario se establecen arcos entre ellos que consumen toda la energía, evitando la amplificación. Otra causa de la aparición de arcos, son irregularidades en los electrodos, por lo que se recomienda pulirlos antes de instalarlos. Debe lograrse una descarga uniforme plana de color violeta que debe verse a través de una lámina de vidrio o algún otro material transparente que absorba el ultravioleta para evitar daño en los ojos. Una vez obtenida esta descarga el sistema ya comienza a funcionar. Si se utiliza un espejo posterior, es necesario alinearlo con el eje de la descarga. La forma más simple de visualizar la emisión láser es colocar un papel frente a los electrodos y mirar su fluorescencia, esta emisión se realiza si el papel es fluorescente.

*Dado que estos láseres utilizan altas tensiones es necesario que los trabajos de los estudiantes sean supervisados.*

Es importante tener en cuenta que luego de apagado el láser, los capacitores continúan cargados, por lo que es necesario descargarlos antes de cualquier otra operación con el mismo.

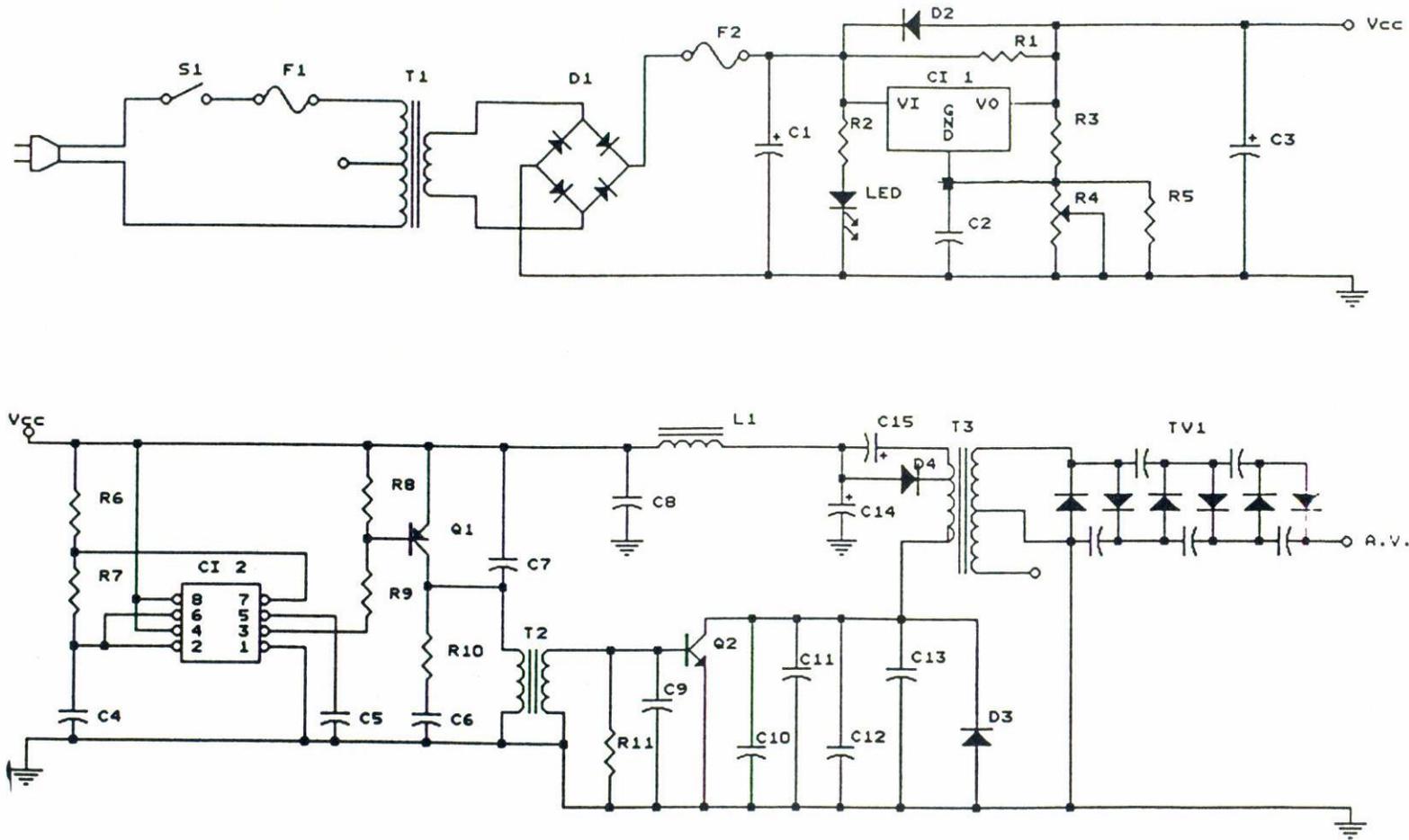


FIGURA 3. Fuente de alta tensión variable.

TABLA I. Componentes de la fuente de alta tensión. Ce indica capacitor electrolítico, C9 a C13 cerámicos,

CI1 - LM7805	Ce1 - 3300 $\mu$ F / 25 V
CI2 - LM555	C2 - 0.1 $\mu$ F
Q1 - TIP125	Ce3 - 1000 $\mu$ F
Q2 - 2SC1617	C4 - 0.0027 $\mu$ F
D1 - PUENTE 1 A	C5 - 0.1 $\mu$ F
D2 - 1N4001	C6 - 0.022 $\mu$ F
D3 - 1S1835 DAMPER	C7 - 0.0033 $\mu$ F
D4 - 1S1835 DAMPER	C8 - 0.1 $\mu$ F
TV1 - TVK 76P	C9 - 0.01 $\mu$ F / 250 V
R1 - 56 $\Omega$ / 1 W	C10 - 0.0022 $\mu$ F
R2 - 1 K $\Omega$ / 1/4 W	C11 - 0.01 $\mu$ F
R3 - 100 $\Omega$ "	C12 - 0.022 $\mu$ F
R4 - 500 $\Omega$ (POT)	C13 - 820 pF
R5 - 150 $\Omega$ / 1/4 W	Ce14 - 470 $\mu$ F / 16 V
R6 - 12 K $\Omega$ "	Ce15 - 220 $\mu$ F
R7 - 10 K $\Omega$ "	T1 - 127 V / 12 V, 1 A
R8 - 1 K $\Omega$ "	*T2 - 93B006
R9 - 470 $\Omega$ "	*T3 - 93D005 o 12D003 (Fly back).
R10 - 220 $\Omega$ "	L1 - 100 $\mu$ H
R11 - 68 $\Omega$ "	F1 - 0.5 A
	$\mu$ F2 - 1 A

\* Componentes de televisor Hitachi b/n 12" mod. SV-C.

## 6. CARACTERÍSTICAS ÓPTICAS Y ELÉCTRICAS

Debido al ruido electromagnético que genera la descarga, para realizar las medidas que se describen a continuación, el láser con electrodos de 6 cm de largo separados 2 mm con capacidad de 1070 pF cargado a 9 kV, fue instalado dentro de una jaula de Faraday.

En la Fig. 4 se muestra la forma temporal de un pulso láser, con un ancho medio (FWHM) de 2.9 ns medido con un fotodiodo rápido MRD721 de Motorola (tiempo de respuesta menor a 1 ns) polarizado a 24 V, en un osciloscopio Tektronix TDS 540 con un ancho de banda de 500 MHz, registrado en un graficador Tektronix HC100.

La energía de los pulsos fue medida enfocando con óptica de cuarzo la salida del láser a un detector piroeléctrico RjP-735 calibrado en 337.1 nm con display RjP-700, ambos de Laser Precision Corp.

El ancho de banda de 0.5 nm fue medido con un Analizador Optico Multicanal (OMA) modelo ST-120 con detector de 1024 diodos IRY-700S/RG de Princeton Instruments Inc., adosado a un monocromador de 275 mm SpectraPro<sup>MR</sup> con rejilla de 1200 líneas/mm de Acton Research Corporation, teniendo el sistema una resolución de 0.065 nm por canal.

En la Fig. 5 se muestra la forma del pulso de alta tensión entre los electrodos medida con una punta Tektronix P6015, simultáneamente con un pulso láser. La energía promediada sobre 100 pulsos a 20 Hz es de 123  $\mu$ J, una potencia pico de 42 kW, con una potencia

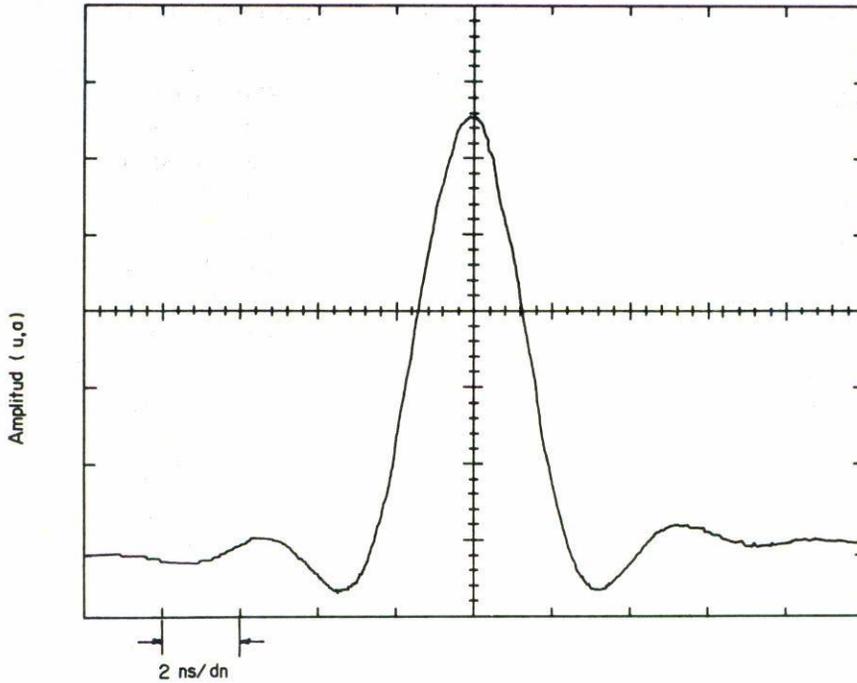


FIGURA 4. Pulso láser.

promedio de 2.5 mW y una eficiencia del 0.14%. En el estudio de la estabilidad de los pulsos se midieron variaciones de amplitud menores al 10% sobre un promedio de 1000 pulsos.

De la Fig. 5 es claro que la eficiencia de este láser puede ser incrementada, dado que la amplificación ocurre antes de que toda la energía sea entregada a la cámara de descarga. Para ello es necesario reducir las inductancias del circuito y variar la separación, forma y largo de los electrodos.

La fotografía muestra el láser de N<sub>2</sub>, donde en la parte superior se encuentra la cámara de descarga y en la inferior, la fuente de alto voltaje con su control y la llave rápida.

### 7. EXPERIENCIAS DIDÁCTICAS

Con este láser es posible realizar una serie de experimentos didácticos, que abarcan desde la parametrización y optimización del mismo hasta aplicaciones de fluorescencia y excitación de láseres de colorantes [1].

Con respecto a la parametrización, dado lo simple del sistema, es posible variar todos los parámetros con relativa facilidad. Por ejemplo, se ha variado el largo de los electrodos (6, 9 y 12 cm); capacidades entre .5 y 1.5 nF; la separación de los electrodos entre .1 a 5 mm y la tensión de carga entre 8 y 13 kV. Se ha logrado aumentar la energía de los pulsos un 30% (160 μJ) para un láser con electrodos de 12 cm, separados 3 mm, capacidad 1.07 nF, tensión de carga 13 kV, a expensas de una reducción en la estabilidad de los pulsos, teniendo éstos variaciones en amplitud del 40%. Los electrodos y capacitores,

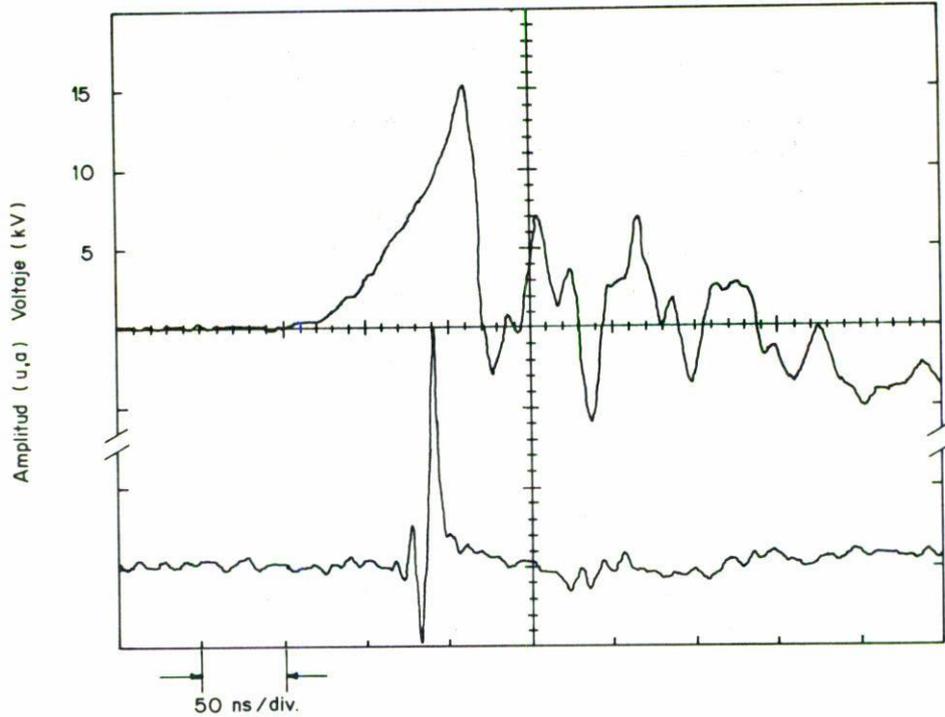


FIGURA 5. Pulso de voltaje entre los electrodos y emisión láser.



Fotografía del sistema láser.

pueden ser cambiados fácilmente en su forma, dimensiones y materiales con el fin de variar la energía y dimensiones del haz de salida, la eficiencia del láser, la estabilidad, frecuencias de repetición y ancho temporal de los pulsos.

TABLA II.

Características	Especificaciones
Potencia pico	76 kW
Ancho de pulso efectivo	2.9 ns
Energía por pulso	220 $\mu$ J
Repetición	1-20 p.p.s.
Potencia promedio	4.4 mW
Longitud de onda	337.1 nm
Ancho de banda	0.5 nm
Dimensiones de haz	1 $\times$ 3 mm
Divergencia del haz	4 miliradianes en ancho 22 miliradianes en largo

Generalmente para aplicaciones de este láser se busca aumentar la energía de salida con una buena reproducibilidad de los pulsos, por lo que es necesario aumentar las dimensiones del medio activo y la tensión de carga, pero esto trae asociadas inestabilidades en la descarga. Una forma de reducir este inconveniente es introducir sistemas de pre-ionización. El más simple, consiste en extender el electrodo del capacitor de alta tensión de forma de obtener un efecto corona en la cámara [10]. Con ello se ha mejorado notablemente la estabilidad de los pulsos, logrando variaciones de amplitud menores al 5% sobre un promedio de 1000 pulsos. Otra alternativa es construir un *spark-gap* abierto y utilizar la radiación ultravioleta para pre-ionizar la cámara.

El *spark-gap* es también un elemento importante a tener en cuenta tanto en su construcción como en la ubicación del mismo en el circuito, cuando se busca aumentar la eficiencia del láser con una buena estabilidad de los pulsos. Se pueden construir llaves rápidas con control de disparo (*triggered spark gaps*); presurizadas, que disminuyen la inductancia o con flujo de gas que evita el calentamiento y variaciones en la tensión de ruptura [11].

Debido a que estos láseres funcionan aun sin una verdadera cavidad óptica, la calidad del haz es mala, pero puede ser mejorada con cavidades completas estables o inestables y el diseño apropiado de electrodos [6, 7].

Con dos de estos láseres es posible instrumentar fácilmente sistemas oscilador-amplificador para aumentar la energía y mejorar la calidad del haz [12].

Para medir la energía de los pulsos en forma económica, es posible calibrar un fotodiodo de silicio económico (por ejemplo el MRD721) con un medidor de energía comercial. Para ello, es necesario conocer las pérdidas que ocasiona la óptica de enfoque sobre la superficie sensible del detector y la respuesta del mismo para la longitud de onda de 337 nm. Estos tabajos introducen a los estudiantes en las técnicas ópticas de fotometría y radiometría.

De todas las experiencias de aplicaciones de estos láseres [2], las de fluorescencia son quizás las más interesantes y, dentro de ellas, el bombeo de láseres de colorantes orgánicos. Utilizando un espejo plano de aluminio, se han obtenido eficiencias del 0.25% con energías de 220  $\mu$ J (véase Tabla II) que son suficientes para excitar colorantes con alta ganancia en cavidades pequeñas. Estas energías son superiores a las obtenidas por modelos comerciales

de láseres de nitrógeno de baja presión (120  $\mu$ J, modelo VSL-337 de Laser Science, Inc.) que se utilizan para el bombeo de láseres de colorantes (modelo VSL-Dye laser de Laser Science, Inc.) [13].

La parametrización y optimización de este tipo de láseres de nitrógeno es primordial para luego utilizarlo en las aplicaciones. Es por esto que se hace énfasis en estos puntos y es aquí donde hay mucho por hacer y aprender, ya que los modelos físicos de estas descargas eléctricas, las técnicas de medidas de los parámetros ópticos y eléctricos y las consideraciones de diseño son un problema abierto.

## 8. CONCLUSIONES

Se han instrumentado láseres de N<sub>2</sub> que trabajan a presión atmosférica, económicos, de fácil construcción y que pueden ser implementados por estudiantes de nivel medio y superior en un par de semanas. Asimismo, se ha trabajado en la parametrización y optimización de estos láseres, cuyas especificaciones para uno con electrodos pre-ionizados de 6 cm, con espejo posterior plano de aluminio, se resumen en la Tabla II y son comparables a los modelos comerciales de baja presión.

En la construcción, parametrización y optimización de estos láseres, es donde las experiencias adquiridas por los estudiantes son formativas, además de ofrecer múltiples posibilidades de investigación y desarrollo.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por la DGAPA-UNAM proyectos DO103592/IN103692 y CONACYT proyecto 1648-A9209.

## REFERENCIAS

1. J. Hetch, *Laser Focus World* **29**, No. 5 (1993) 87.
2. J.P. Singh y S.N. Thakur, *J. Sci. Ind. Res.* **39** (1980) 613.
3. A.W. Ali, A.C. Kolb y D. Anderson, *Appl. Optics*. **6** (1967) 2115.
4. A.W. Ali, *Appl. Optics* **3** (1969) 993.
5. C.L. Strong, *Scientific American*, **230** (1974) 122.
6. M. Fernandez Guasti, A. Silva Pérez, D. Iturbide Castillo, E. Haro Poniatowski, L. Escobar Alarcón, P. Habichayn Polloni, A. García García, R. Cudney Bueno, C. García Guerrero y E. González Avalos, *Rev. Mex. Fís.* **38** (1992) 588.
7. A. Vázquez Martínez y V. Aboites *Rev. Mex. Fís.* **39** (1993) 396.
8. A.A. Serafetinides y G.N. Tsikrikas, *Optics Comm.* **79** (1990) 448.
9. J.D. Shipman, *Appl. Phys. Lett.* **10** (1967) 3.
10. E. E. Bergmann, *Appl. Phys. Lett.*, **28** (1976) 84.
11. N.M Shaheen, *Meas. Sci. Technol.* **1** (1990) 659.
12. V.J. Pinto, V. Aboites y J. de la Rosa, *Rev. Mex. Fís.* **37** (1991) 665.
13. VSL Manual, Laser Science, Inc. (1986) 2.