

# Diseño y construcción de láseres de nitrógeno molecular

M. FERNÁNDEZ GUASTI, A. SILVA PÉREZ, D. ITURBE CASTILLO,  
E. HARO PONIATOWSKI, L. ESCOBAR ALARCÓN, P. HABICHAYN POLLONI,  
A. GARCÍA GARCÍA, R. CUDNEY BUENO,  
C. GARCÍA GUERRERO Y E. GONZÁLEZ AVALOS

*Laboratorio de Optica Cuántica  
Universidad Autónoma Metropolitana-Unidad Iztapalapa  
Apartado postal 55-534, México, D.F.*

Recibido el 11 de febrero de 1992; aceptado el 25 de mayo de 1992

**RESUMEN.** Se presenta el diseño y construcción de diversos prototipos de láseres de nitrógeno molecular partiendo de los mecanismos fundamentales de operación. Se describe con detalle el prototipo más reciente, tanto en los materiales utilizados como en sus diversas etapas de construcción, con el propósito de que el interesado pueda reproducir su fabricación. Se presentan las características y parámetros de operación.

**ABSTRACT.** We present the design and construction of several prototypes of nitrogen lasers starting from the fundamental principles of operation. The most recent prototype is considered in detail, describing the materials used and the various stages of construction. This description is intended for the reader interested in assembling one of such lasers. The characteristics and operating parameters are presented.

PACS: 42.60.By; 42.60.Da

## 1. INTRODUCCIÓN

Los láseres de nitrógeno molecular pueden operar tanto en el ultravioleta como en el infrarrojo y debido a las características de la estructura cuántica de la molécula el sistema es intrínsecamente pulsado. La emisión ultravioleta ( $3371 \text{ \AA}$ ) es superradiante, es decir, puede emitir coherentemente sin necesidad de cavidad óptica debido a su alta ganancia. La excitación inicial de las moléculas (bombeo) se lleva a cabo por impacto electrónico, dicha excitación puede ser longitudinal o transversal. Los principales atractivos de estos láseres son su bajo costo, su facilidad de operación y su alta potencia.

La motivación para fabricar sistemas de nitrógeno molecular tiene en la actualidad cuatro vertientes:

- i) Obtener pulsos ultracortos de alta potencia, ya sea por medio de cavidades muy pequeñas, o por medio de retroalimentación espacialmente distribuida (*distributed feedback*).
- ii) Desarrollar la infraestructura precedente para la fabricación de láseres de excímero.
- iii) Disponer de fuentes láser en el ultravioleta con potencias moderadas y bajo costo, para realizar estudios espectroscópicos, bombear láseres sintonizables de pigmento orgánico, etc.

iv) Utilizar estos sistemas para programas de docencia, que resultan de gran motivación para los estudiantes.

En el presente trabajo hemos tratado de recoger la experiencia acumulada sobre el diseño y fabricación de láseres de nitrógeno, incluyendo aspectos prácticos que frecuentemente se omiten en la literatura. En la Sec. 2, describimos la teoría de operación y en las Secs. 3, 4 y 5 analizamos las distintas partes ópticas y electrónicas del sistema. En la Sec. 6 se muestran las características de nuestro prototipo más reciente. Finalmente, la Sec. 7 menciona algunas aplicaciones y las conclusiones que hemos obtenido.

El primer sistema de emisión láser en el ultravioleta fue realizado por Heard en 1963 [1] por medio de una descarga longitudinal, alcanzando potencias muy modestas; Leonard en 1965 [2], obtuvo operación láser por medio de excitación transversal logrando potencias pico del orden de 20 kW. A partir de esta fecha muchos investigadores realizaron estudios en este sistema, llegando a obtener potencias de 600 kW pico en pulsos de 5 ns de duración que pronto se volvieron comerciales.

En años recientes ha declinado parcialmente la investigación en los láseres de nitrógeno, debido a que se han desarrollado láseres denominados de excímero con características de excitación idénticas a los láseres de nitrógeno, pero con eficiencia cuántica mucho mayor, y por ende mayor potencia. Sin embargo, los excímeros son sistemas mucho más costosos, necesitan gran precaución en el manejo de sus gases, y requieren mayor mantenimiento.

El desarrollo de nuestro trabajo tiene antecedentes en México en otros grupos que han abordado este problema y sus aportes han sido valiosos para nuestra investigación [3-6].

## 2. TEORÍA DE OPERACIÓN

### 2.1 Niveles energéticos y transiciones láser

Los láseres de gas frecuentemente se subdividen en tres tipos según el medio activo: atómicos, iónicos y moleculares. Los sistemas moleculares, a diferencia de los atómicos, además de tener niveles energéticos electrónicos, poseen subniveles vibracionales y rotacionales. La transición óptica se puede llevar a cabo entre distintos niveles electrónicos, distintos niveles vibracionales, o en diversas combinaciones de ellos.

El nitrógeno atómico tiene siete electrones, dando lugar a una estructura espectroscópica de dobletes; en el nitrógeno molecular, sin embargo, el número de electrones se duplica y siendo entonces un número par, el sistema da lugar a una estructura de singuletes y tripletes. El primer sistema positivo de bandas de emisión es aquel en el que los momentos orbitales totales de cada átomo de la molécula son cero (*i.e.*  $^4S$ ). La banda de singuletes tiene emisiones al estado base en el ultravioleta (UV). La banda de tripletes tiene emisiones en el infrarrojo (IR), en el visible y en el UV que dan lugar a la emisión fluorescente que se observa en el tubo de un láser de este tipo [7]. El triplete de menor energía ( $A^3\Sigma_u^+$ ) es obviamente metaestable, pues sólo puede decaer al singulete base  $X^1\Sigma_g^+$ , siendo ésta una transición fuertemente prohibida en la región de 2500 a 4000 Å ( $A^3\Sigma_u^+ - X^1\Sigma_g^+$ ). Todavía dentro del primer sistema positivo de tripletes está el nivel  $B^3\Pi_g$  que decae al  $A^3\Sigma_u$  generando una banda de 7000 a 15000 Å, en la cual se ha observado radiación láser en el cercano IR. En el segundo sistema positivo, el momento orbital total de uno de los

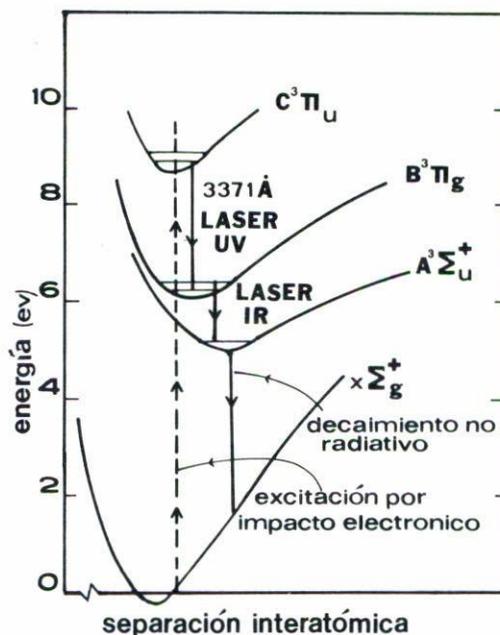


FIGURA 1. Niveles energéticos relevantes en la transición láser de la molécula de nitrógeno.

átomos pasa de  $^4S$  a  $^2D$ ; en esta rama se encuentra el nivel  $C^3\Pi_u$  y éste decae al nivel  $B^3\Pi_g$  en una transición de dipolo permitida ( $J = 1$  a  $J = 0$ ) en el UV entre 2950 y 3371 Å como se muestra en la Fig. 1. Es en esta transición superradiante que se puede obtener radiación láser y a ella dedicamos el resto de este estudio. Los tiempos de vida medio  $\tau$  de los distintos niveles en la banda de tripletes son [7]:

$$\tau(C^3\Pi_u) = 4.7 \times 10^{-8} \text{ s},$$

$$\tau(B^3\Pi_g) = 8.0 \times 10^{-6} \text{ s},$$

$$\tau(A^3\Sigma_u) = 2.0 \text{ s}.$$

Debido a que el nivel  $C^3\Pi_u$  tiene menor duración que el  $B^3\Pi_g$ , la transición láser entre estos niveles se autotermina, ya que después de un tiempo del orden de  $4.7 \times 10^{-8}$  s no puede haber inversión de población entre los primeros dos niveles. El resultado es entonces un láser inherentemente pulsado.

### 1.2 Mecanismo eficiente de inversión de población

Los láseres de nitrógeno molecular pueden ser excitados por impacto electrónico longitudinal o transversal a la dirección en que se emite la radiación. La potencia que se puede obtener del sistema, en este último caso, es mucho mayor y por ello sólo describimos arreglos de excitación transversal en el resto de este trabajo. La avalancha electrónica de excitación debe ser lo suficientemente rápida para poblar el nivel superior de la transición láser  $C^3\Pi_u$  antes de que éste decaiga al nivel inferior de la transición láser  $B^3\Pi_g$  por

TABLA I. Sección transversal de excitación del estado base  $X^1\Sigma_g^+$  subnivel vibracional cero a los primeros estados vibracionales superior e inferior de la transición láser a 35 eV (unidades de  $10^{-22} \text{ m}^2$ ) [7].

nivel vibracional	0	1	2	3	4	5
sec. trans. $C^3\Pi_u$	6.2	3.8	1.9	< 0.2		
sec. trans. $B^3\Pi_g$	1.8	4.5	6.5	7.1	7.1	4.8

emisión espontánea y no permita ya inversión de población. Esto implica que el tiempo de subida (*risetime*) del pulso electrónico de excitación debe llevarse a cabo en un lapso menor que  $4.7 \times 10^{-8}$  s. Un circuito de descarga que cumple con esta condición lo describimos en la Sec. 4. Por otro lado, debemos considerar las secciones transversales de excitación por impacto electrónico de los distintos niveles de la molécula y adecuar la energía de la avalancha de electrones para excitar lo más selectivamente posible el nivel superior del láser  $C^3\Pi_u$ . Otros mecanismos de excitación electrónica indirecta han sido considerados por distintos autores, pero se cree que el de impacto electrónico directo es el proceso dominante [8]. Las secciones transversales máximas de excitación de los niveles  $C^3\Pi_u$  y  $B^3\Pi_g$  son  $2.5 \times 10^{-17}$  y  $13.0 \times 10^{-17}$  respectivamente, lo cual sugeriría la imposibilidad de obtener inversión de población por medio de impacto electrónico, pues el nivel de emisión láser tiene una sección menor que el nivel al que decae. Se ha sugerido, sin embargo, que es necesario considerar los niveles vibracionales particulares dentro de cada transición, lo cual ha sido calculado utilizando los factores de Frank-Condon y los resultados se muestran en la Tabla I. Puede notarse, entonces, a pesar de que la inversión de población global entre los niveles no es posible, que se puede lograr inversión de población entre los niveles vibracionales  $V$ :

$$V(C^3\Pi_u) = 0 - V(B^3\Pi_g) = 0 \quad [0.449],$$

$$V(C^3\Pi_u) = 1 - V(B^3\Pi_g) = 0 \quad [0.390],$$

$$V(C^3\Pi_u) = 0 - V(B^3\Pi_g) = 1 \quad [0.329],$$

donde hemos incluido, en los paréntesis de la derecha, los factores de Frank-Condon, que representan las probabilidades de transición entre estos subniveles. Se ha observado transición láser en los tres casos en longitudes de 3371, 3159 y 3577 Å, respectivamente. La energía de los electrones de bombeo, puede inferirse de la temperatura electrónica, la cual depende de la aceleración que produce el campo eléctrico transversal y la razón a la que pierden energía los electrones por impacto con las moléculas de nitrógeno. Una derivación posible es la siguiente.

La energía promedio de los electrones está dada por  $\frac{1}{2}m_e\langle v_e \rangle^2 = k_b T_e$ , donde  $m_e$  es la masa del electrón,  $v_e$  es su velocidad,  $k_b$  es la constante de Boltzmann y  $T_e$  es la temperatura electrónica [9]. Por otro lado, la fuerza que el campo ejerce sobre un electrón está dada por  $eE$ , donde  $e$  es la carga del electrón y  $E$  es el campo eléctrico. La energía que se transfiere a los átomos por impacto electrónico es entonces  $eE\lambda_e\delta$ , donde  $\lambda_e$  es el camino libre medio y  $\delta$  es la fracción promedio de energía transferida al átomo [10].

Realizando un balance de energía obtenemos:

$$k_b T_e = eE\lambda_e \delta. \quad (1)$$

El camino libre medio puede ser reescrito en términos de la sección transversal  $\sigma_e$  [7] como  $\lambda_e = (N_{N_2}\sigma_e)^{-1}$ , donde  $N_{N_2}$  es el número de átomos por unidad de volumen. Reescribiendo esta cantidad en la aproximación de gas ideal obtenemos  $P_{N_2} = N_{N_2}k_bT_2$ , de donde

$$k_b T_e = \frac{ek_b T_{N_2} \delta}{\sigma_e} \frac{E}{P_{N_2}}. \quad (2)$$

Ahora bien, la transferencia selectiva al nivel  $C^3\Pi_u$  se logra cuando la energía promedio de los electrones es igual a la energía de la transición  $X^1\Sigma_g^+ - C^3\Pi_u$  que es aproximadamente de  $\hbar\omega = 12$  eV [11]. La temperatura electrónica debe ser entonces  $T_e = 1.39 \times 10^5$  K. Considerando la temperatura del gas ambiente  $T_{N_2} = 293$  K, el cociente  $E/P$  queda unívocamente determinado por el nivel que se desea excitar (a través de  $T_e$ ), la sección transversal eficaz de impacto electrónico  $\sigma_e$  y la fracción de energía transferida  $\delta$ . Dicha fracción es compleja de evaluar, una estimación para bajas frecuencias de colisión a densidad electrónica baja ( $N_e < 10^{10}$  cm<sup>-3</sup>) es [7]:

$$\delta = \left( \frac{4m_e}{3m_{N_2}} \right)^{1/2} = 5.09 \times 10^{-3}.$$

La sección transversal de excitación total al nivel  $C^3\Pi_u$  considerado como la suma de los primeros cuatro niveles vibracionales es de  $\sigma_e = 1.21 \times 10^{-21}$  m<sup>2</sup>, el cociente del campo sobre la presión es entonces

$$\frac{E}{P} = \frac{T_e \sigma_e}{T_{N_2} e \delta} = 7.05 \times 10^2 \text{ Vm}^{-1}\text{Pa}^{-1},$$

considerando un voltaje de 10 kV por centímetro y utilizando la conversión de Pascales (MKS) a Torr (1 Pa =  $0.75 \times 10^{-2}$  torr) obtenemos

$$P = 10.65 \text{ torr}. \quad (5)$$

De estas expresiones es claro que el cociente del campo eléctrico entre la presión del gas tiene un valor óptimo de excitación. El valor obtenido es del orden de magnitud del óptimo que se encuentra experimentalmente como discutiremos en la Sec. 3. La principal limitante del esquema teórico anterior es el hecho de que la Sec. transversal  $\Sigma_e$  no es independiente de la energía de los electrones al momento de impacto. La Tabla II muestra la sección transversal de excitación del N<sub>2</sub> al nivel  $C^3\Pi_u$  por impacto electrónico para distintas energías electrónicas [12]. De estos datos se observa que la máxima sección transversal se encuentra a aproximadamente 14 eV. Sin embargo, éstos son valores totales, que incluyen todos los niveles vibracionales y la importante dependencia del nivel

TABLA II. Sección transversal de excitación del estado base  $X^1\Sigma_g^+$  al nivel  $C^3\Pi_u$  para diversas energías electrónicas (unidades de  $10^{-20} \text{ m}^2$ ) [12].

energía electrónica (eV)	12	13	14	15	16	17
nivel $C^3\Pi_u$	0.146	0.298	0.443	0.389	0.284	0.234

vibracional que discutimos previamente no está siendo considerada. A 14 eV, la excitación de altos niveles vibracionales es más probable, y algunos investigadores han utilizado helio como amortiguador (*buffer*) para relajar a las moléculas de estos niveles al estado basal vibracional. Nuestros resultados experimentales, solamente cualitativos, indican que el helio aumenta mínimamente la eficiencia del láser.

### 3. CAVIDAD ÓPTICA

#### 3.1 Criterios de diseño y experiencia previa

Los láseres de nitrógeno molecular operan con una presión que va de unos cuantos torr a presión atmosférica. La existencia de aire en el medio activo, y en particular de oxígeno, inhibe la emisión láser, por lo que es necesario contar con una cavidad bien sellada si se opera a baja presión. Se pueden utilizar cavidades abiertas si se opera el sistema con presiones mayores a la presión atmosférica, sin embargo, el gasto de gas es entonces muy alto y hemos observado que la eficiencia del láser es menor, debido a que hay mayor arqueamiento.

##### 3.1.1 Paredes del contenedor

Los primeros prototipos de contenedor (cavidad) diseñados en el laboratorio fueron de acrílico debido a la facilidad de su maquinado, sin embargo ha resultado más adecuado, para minimizar las fugas, utilizar paredes de vidrio. El vidrio debe ser inastillable para ofrecer mayor resistencia a movimientos mecánicos y prevenir accidentes en caso de ruptura de las paredes durante la operación. Por otro lado, la radiación ultravioleta degrada al acrílico a largo plazo, nuestros primeros prototipos de acrílico después de un año de operación comenzaron a mostrar rajaduras y eventualmente fugas por las mismas. El vidrio inastillable automotriz que hemos utilizado no se ha degradado visiblemente en tres años de uso continuo. Para mantener un buen vacío, en nuestro prototipo más reciente, se realizó un doble sellado como se describe en la Sec. 3.2; se usó pegamento rígido de vacío (marca torr-seal) para que adherieran bien las uniones vidrio-vidrio y vidrio-metal. En prototipos anteriores se había utilizado pegamento de silicón, que es más flexible pero su sellado es más pobre. También hemos utilizado plastilina epóxica cuando las uniones presentan separaciones considerables debido a limitaciones en el maquinado. La plastilina, en estos casos, es más adecuada debido a su consistencia, sin embargo este pegamento degasa más que el torr-seal.

### 3.1.2 Electroodos

Es necesario hacer fluir el gas en la cavidad si se desean obtener repeticiones de pulsos mayores a 0.5 Hz, ya que de otra manera se acumula la población en el triplete metaestable  $A^3\Sigma_u$  debido a que su tiempo de vida es extremadamente largo como se mencionó en la Sec. 2. En los primeros prototipos, la entrada y salida del gas se colocaron en los extremos de la cavidad, pero debido a la longitud de la misma (0.15 a 0.90 m) el tiempo que permanecía el nitrógeno en la cavidad era largo y su distribución poco uniforme. En los prototipos recientes se hace fluir el gas de manera transversal por medio de pequeños orificios en los electrodos de descarga, dichos electrodos son tubulares en vez de barras sólidas.

Los parámetros variables de los electrodos son su perfil, su longitud, el material del que están hechos y la separación entre electrodos. El perfil debe asegurar una distribución lo más homogénea posible de la avalancha de electrones en el medio activo y permitir que las uniones con los demás materiales que conforman la cavidad sea buena; en algunas cavidades hemos utilizado perfiles cilíndricos los cuales son fáciles de maquinar o bien pueden obtenerse de tubos comerciales sin necesidad de maquinado. Estos últimos facilitan la construcción, pero no permiten un control muy estricto de la separación entre electrodos, ni podemos modificar la forma de dicho tubo. Un perfil que permite mantener la separación de electrodos constante, mejor manipulación del volumen activo y asegurar mayor superficie de contacto para las uniones se describe en la Sec. 3.2. Reportes previos han hecho simulaciones de la distribución del campo electrostático en diversos perfiles y coinciden en favorecer este tipo de perfil [13].

El criterio para elegir la longitud de los electrodos y determinar la longitud de la cavidad depende de la duración del pulso del láser. Esta duración tiene como máximo el tiempo de vida media del nivel excitado que es de 47 ns, al cual hay que restar el tiempo de subida de la avalancha electrónica. Este tiempo es difícil de evaluar debido a la inductancia intrínseca de la mayoría de los aparatos de medición. Experimentalmente, los pulsos más largos que se obtienen son de 13 ns. En este tiempo un fotón recorre 3.9 m, equivalente a una cavidad con longitud de 1.95 m. Esta longitud es la máxima utilizable en el escalamiento de la cavidad. A medida que la longitud de la cavidad aumenta, la energía por pulso aumenta linealmente para longitudes cortas ( $\ll 1.95$  m). Experimentalmente hemos encontrado que cavidades mayores a 0.6 m muestran ya una ganancia mínima, de manera que su construcción no se justifica. Nosotros hemos construido cavidades desde 0.20 m de largo con electrodos de 0.17 m. hasta cavidades de 0.9 m con electrodos de 0.9 m.

Se consideraron cuatro parámetros importantes para la elección del material a emplear: a) función de trabajo del material, b) dureza, c) conductividad, d) facilidad de maquinado.

a) Dado que la función de trabajo es la energía necesaria para arrancar un electrón de un determinado material, entonces requerimos un material cuya función de trabajo sea pequeña. Nosotros hemos construido electrodos de aluminio, cobre (tubo), bronce y latón. El bronce es una aleación constituida principalmente con 80% de cobre y 20% de estaño, con buenas propiedades mecánicas y gran resistencia a la corrosión y al desgaste. El latón es una aleación constituida fundamentalmente por 70% de cobre y 30% de zinc. Las funciones de trabajo para estos metales son; aluminio 5.10–5.47 eV, cobre 4.48–4.94 eV,

estaño 4.42 eV y zinc 4.33–4.90 eV [14]. Como el bronce y el latón son aleaciones de algunos de estos elementos, podemos considerar su función de trabajo del mismo orden.

b) Se necesitan metales con cierta dureza para evitar el desprendimiento de partículas durante la descarga eléctrica y así evitar impurezas en la cavidad (*sputtering*). La dureza de los materiales empleados en escala del 1 al 10 donde el 10 corresponde al carbón, son las siguientes: para el aluminio va de 2.0 a 2.9, para el cobre de 2.5 a 3.0, para el zinc es de 2.5, para el estaño de 2.0 y para el bronce de 3.0 a 4.0 [14]. Hay metales más duros, pero sus propiedades mecánicas y su conductividad son deficientes.

c) Claramente también requerimos de un buen conductor, para mantener el mismo potencial a lo largo de todo el electrodo para cualquier frecuencia de descarga. El valor de la resistividad a 20°C, es para el aluminio de  $2.82 \mu\Omega\text{-cm}$ , para el cobre de  $1.72 \mu\Omega\text{-cm}$ , y para el bronce de  $7.0 \mu\Omega\text{-cm}$  [14]. Existen materiales conductores con mayor conductividad, pero generalmente su costo es inaccesible.

d) Otro parámetro importante es el de tener un material fácil de maquinarse, ya que para la fabricación de electrodos se necesita un maquinado fino, incluyendo barrenados, fresados y limados para poder adecuar el perfil de los electrodos. En términos generales el aluminio, cobre, bronce y latón tienen buenas propiedades mecánicas lo que facilita su maquinado. Tomando en cuenta estos factores hemos usado bronce y latón para los electrodos más recientes.

La separación entre los electrodos está íntimamente relacionada con el campo eléctrico existente entre los mismos para un voltaje constante de alimentación. A mayor separación tenemos menor campo eléctrico, esto repercute en una menor energía de los electrones lo cual puede generar una inadecuada excitación de las moléculas de nitrógeno por dichos electrones. Por otro lado, si aumentamos la distancia entre los electrodos aumentará el volumen activo involucrado en la descarga generando mayor energía en el pulso de salida. Se busca entonces un balance entre la separación de electrodos y el voltaje aplicado a éstos. También debemos considerar la presión de nitrógeno a la que va a operar el láser, ya que esto definirá la trayectoria libre de los electrones. Una separación de 0.02 m ha sido la más usual. En la Fig. 2, mostramos curvas de potencia emitida por el láser para distintos voltajes entre electrodos y presiones del gas. El espejo de retroalimentación era externo a la cavidad y los electrodos de 0.9 m de longitud en la gráfica mostrada. La energía, en este caso particular, se midió con una termopila 14BT, calibrada por el National Physical Laboratory [15]. Resultados análogos, mostrando el mismo comportamiento, se han obtenido con las distintas cavidades que hemos construido. El óptimo se encuentra alrededor de 40 torr, valor superior al calculado teóricamente. Esta diferencia se debe posiblemente a que en el modelo teórico se consideró la sección transversal de excitación electrónica independiente de la energía electrónica como se mencionó en la Sec. 2.2.

### 3.1.3 Ventana y espejo

Anteriormente a la construcción de la cavidad descrita en la siguiente sección, hubo dos construcciones diferentes. En la primera la cavidad estaba constituida por una caja de acrílico de  $0.03 \times 0.10 \times 0.30$  m, de la cual las paredes de  $0.03 \times 0.30$  m eran dos tubos

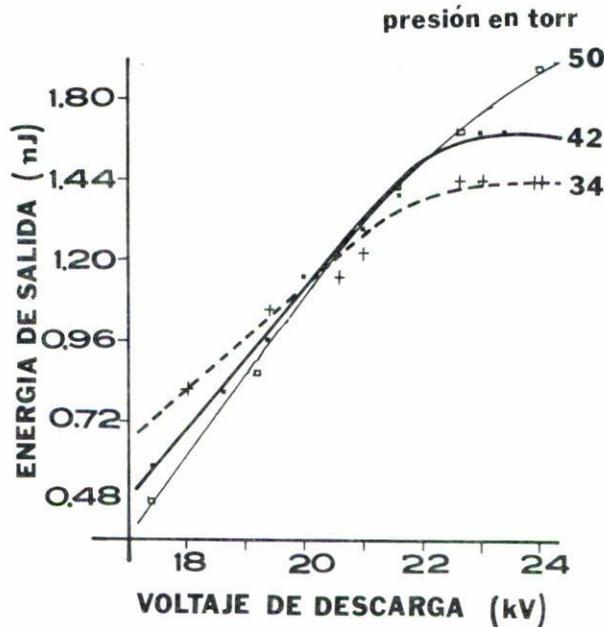


FIGURA 2. Potencia de salida (mJ) del láser contra voltaje pico (kV) de descarga para distintas presiones del gas (torr).

de bronce maquinados de 0.015 m de diámetro interior, dichos tubos tenían seis perforaciones cada una de 0.002 m de diámetro por las cuales se hacía fluir el gas (nitrógeno). En la parte posterior estaba colocado un espejo externo a la cavidad y en la parte anterior estaba la ventana de cuarzo por donde salía el haz. La entrada de gas y salida hacia la bomba de vacío se localizaban en la cara donde se encontraban el espejo y la ventana, respectivamente. Todas las uniones fueron hechas con silicón. Experimentalmente se encontró que a menor distancia entre el espejo externo y la cavidad, aumenta la potencia, de manera que se minimizó esa distancia a 0.05 m. Una distancia menor corría el riesgo de producir arqueamientos con la montura metálica del espejo. En la segunda construcción se utilizó una cavidad mayor, la caja de acrílico fue de  $0.03 \times 0.10 \times 0.90$  m, los electrodos se construyeron con tubo de cobre de pared gruesa y no fueron maquinados, facilitando mucho la construcción de la cavidad. Las perforaciones fueron ahora de  $1.5 \times 10^{-3}$  m de diámetro, por las cuales fluía el gas. Una modificación importante fue que en esta cavidad la salida y entrada del gas no se hicieron por las caras de las ventanas (pues esto resultaba peligroso debido al alto voltaje y dificultad de sellado) sino por medio de un codo en el tubo de cobre. En esta cavidad además se ensayó otro dispositivo para colocar el espejo y la ventana de cuarzo integrado a la cavidad. El acoplamiento se hizo de nylon incluyendo tornillos de alineación y mangueras flexibles para aislarlo eléctricamente. En esta cavidad se eliminó entonces la ventana posterior, colocando el espejo en su lugar eliminando así una componente. Por otro lado, este arreglo minimiza la distancia entre la cavidad y el espejo y por lo tanto se obtiene la máxima potencia. Todas las uniones acrílico-acrílico y acrílico-cobre se hicieron con plastilina epóxica.

### 3.2 Construcción de la cavidad más reciente

Aunado a los criterios y experiencia antes descrita, se procuró que todos los elementos que conforman la cavidad se mantuviesen rígidos. Para ello se pensó en un sistema de alineación mediante cuatro tornillos Allen que enroscan en una placa de acrílico y que permiten alinear el espejo y la ventana de cuarzo. Todas estas piezas unidas a la cavidad permiten moverla sin necesidad de realinearla por el cambio de posición. Para darle aún mayor rigidez a la cavidad, los electrodos se fijaron a ángulos de aluminio.

#### 3.2.1 Material

Los materiales utilizados para la construcción de la cavidad son:

- 2 tubos de bronce de 0.178 m de largo, maquinados con cuatro planos.
- 4 tapones de nylamid de 0.025 m de largo con cuerda especial para tubo.
- 2 ángulos de aluminio de  $0.0047 \times 0.0762 \times 0.198$  m.
- 1 patrón de acero *cold-roll* de  $0.02 \times 0.02 \times 0.23$  m.
- Vidrio inastillable: Dos piezas de  $0.005 \times 0.068 \times 0.198$  m. Dos piezas de  $0.005 \times 0.033 \times 0.078$  m con un barreno de 0.020 m de diámetro.
- Pegamento torr-seal.
- 4 cuadros de acrílico  $0.006 \times 0.04 \times 0.04$  m con un barreno de 0.020 m de diámetro y cuatro barrenos para sujeción.
- 1 espejo de aluminio de primera superficie de  $3 \times 10^{-3}$  m de espesor y 0.025 m de diámetro.
- 1 ventana de cuarzo de  $3 \times 10^{-3}$  m de espesor y 0.025 m de diámetro.
- 2 sellos tipo *o'rings* de diámetro interno 0.0206 m, diámetro externo 0.0269 m y grueso 0.0031 m.
- 2 barras de aluminio de  $0.0047 \times 0.025 \times 0.198$  m (cortadas de los ángulos de aluminio).
- tornillos Allen (varias medidas).

Los tubos de bronce maquinados sirvieron como electrodos, la separación entre éstos quedó fijada por el patrón de acero *cold-roll*. Los ángulos de aluminio sirvieron como soportes y tapas laterales de la cavidad, así como conductores. Para las tapas superior e inferior de la cavidad se empleó el vidrio inastillable. Para las tapas anterior y posterior se empleó vidrio inastillable con orificios de 0.02 m de diámetro. Para evitar posibles saltos de corriente se emplearon los 4 tapones de nylon. Las 4 piezas cuadradas de acrílico se emplearon para colocar el espejo reflector y la ventana de cuarzo. Las dos barras de aluminio se emplearon para evitar falsos contactos entre los electrodos de la cavidad y los capacitores.

#### 3.2.2 Modo de construcción

Los tubos de bronce (electrodos) se maquinaron con cuatro planos para favorecer la unión con los otros elementos de la cavidad. En el lugar donde se produce la descarga se hizo un desbaste de material para que el medio excitado fuera más ancho y en los extremos de este lugar se hizo otro desbaste de material para evitar efectos de borde en la descarga como se ilustra en la Fig. 3a. En este caso variando el tamaño de la cara "A" se modifica el grosor del volumen activo.

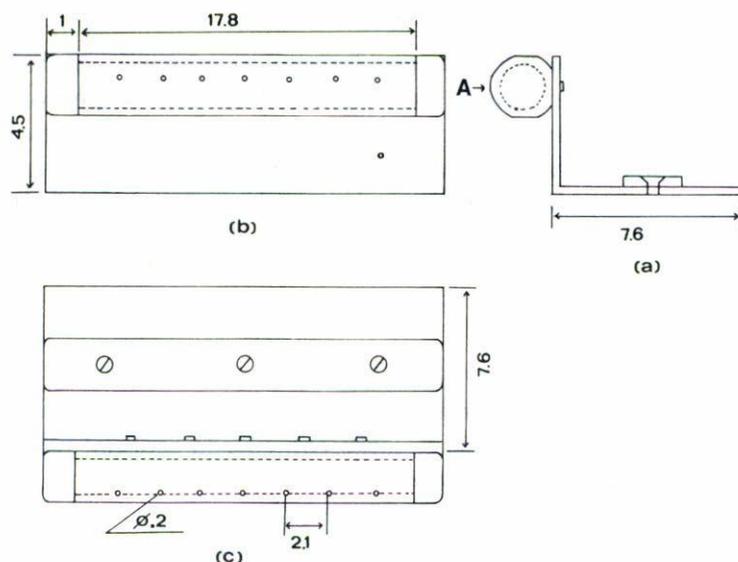
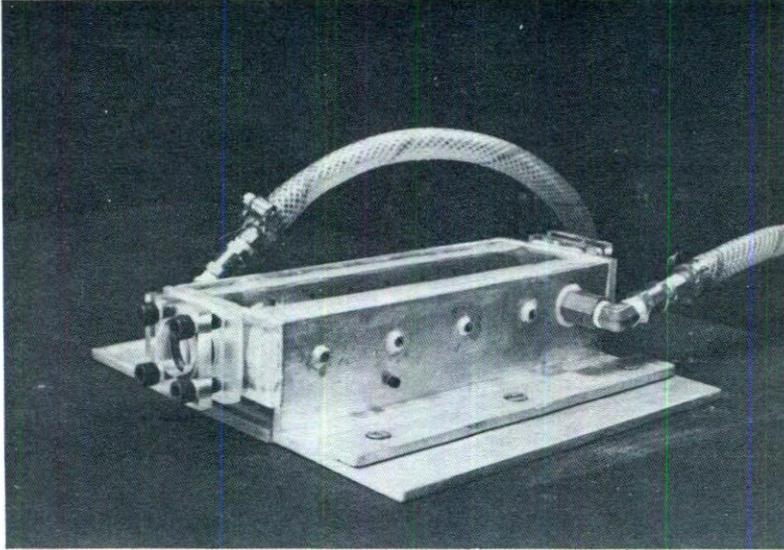


FIGURA 3. a) vista frontal de un electrodo con el ángulo de soporte. La cara "A" define la altura de la zona de descarga. b) y c) vistas lateral y superior de la misma pieza mostrando los orificios de inyección del gas y la solera para sujeción del condensador. Unidades en centímetros.

Previamente se le hicieron orificios a los electrodos para una distribución uniforme del gas. Como se muestra en la Fig. 3b y 3c, se observan 7 barrenos de  $2.3 \times 10^{-3}$  m de diámetro separados  $2.1 \times 10^{-2}$  m por donde se inyecta el gas a la cavidad, otros 7 barrenos en la parte inferior del otro electrodo evacuan el gas, estos últimos se encuentran desfasados con respecto a los barrenos de inyección tanto vertical como horizontalmente con el propósito de asegurar una distribución más homogénea del gas en la cavidad. En este caso el gas recorre la cavidad transversalmente (0.02 a 0.04 m) y por lo tanto el tiempo que permanece el nitrógeno en la cavidad es considerablemente más corto permitiendo así repeticiones más altas. Para asegurar que la presión del gas en los distintos orificios sea la misma la suma de la sección transversal de los orificios se hizo más pequeña que la sección transversal del interior del electrodo que los alimenta. En el caso de la cavidad antes mencionada el diámetro interior del electrodo es de 0.015 m y su área de  $1.77 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>, mientras que la suma de las áreas de los orificios es de  $1.9 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>. Es recomendable avellanar los orificios para evitar efectos de borde que produzcan arqueamiento.

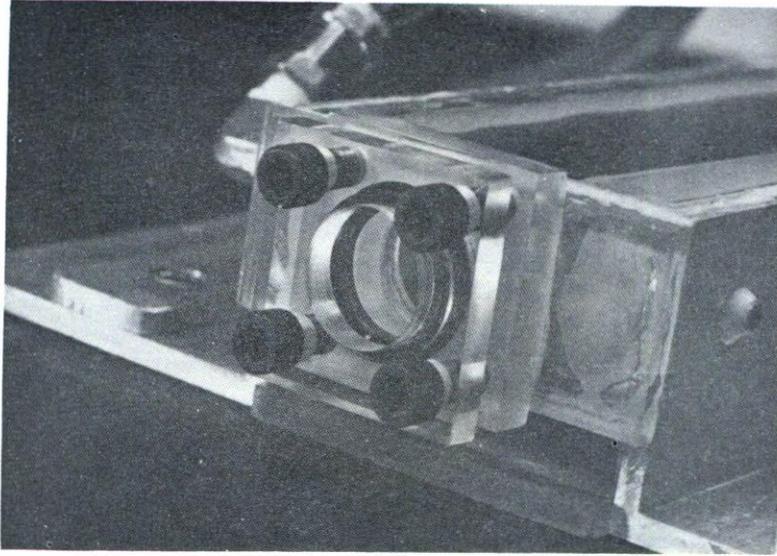
A cada electrodo se le colocaron dos tapones de nylon con cuerda especial para tubo. Se sujetaron los electrodos firmemente con los ángulos de aluminio mediante tornillos Allen. En este punto la cavidad consistía de dos piezas ambas hechas de un electrodo, con tapones de nylon, unido a un ángulo de aluminio (Fig. 3). Después se unieron las tapas superior e inferior de vidrio inastillable (previamente cortado) a los electrodos y ángulos ya unidos. Para la unión se empleó una película uniforme de torr-seal, la cual se logró depositando una cantidad igual de torr-seal con una jeringa. Para fijar las uniones se emplearon 4 prensas, dos presionando los extremos de la cavidad (sobre el vidrio) y las otras dos presionando las tapas laterales (ángulos de aluminio) teniendo cuidado en aplicar la misma fuerza en las prensas. Todo esto se hizo con el patrón de acero *cold-roll*



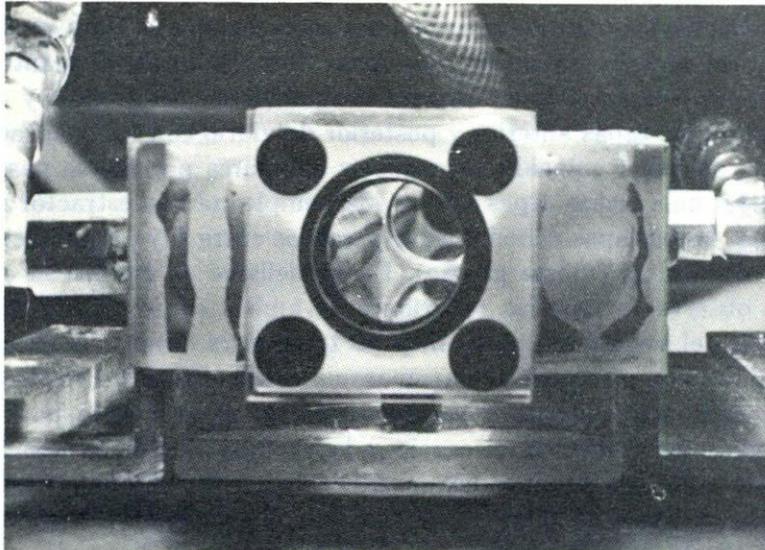
FOTOGRAFÍA 1. Cavidad láser con electrodos de bronce y paredes de vidrio, longitud de 0.20 m.

puesto entre los electrodos para mantener su distancia constante. Para un buen sellado el pegamento torr-seal necesita de un día para secar. Por esta razón se mantuvo la cavidad prensada durante este lapso. Posteriormente se removieron las prensas y el patrón. Por otro lado se unieron las tapas anterior y posterior de vidrio con los cuadrados de acrílico teniendo cuidado en hacer coincidir los orificios circulares por donde pasará el haz del láser. Se procedió a unir dichas tapas a la cavidad empleando un extractor mecánico para colocar cada tapa. Estas tapas deben quedar paralelas entre sí y perpendiculares al plano que forman los electrodos (ajuste grueso). El paralelismo se monitoreó con un haz de láser de He-Ne observando que las reflexiones de ambas caras coincidieran. Puede ser necesario desbastar el asiento al que se unen las tapas para obtener la perpendicularidad deseada. Para el flujo de nitrógeno se barrenaron y machuelaron los electrodos y ángulos de aluminio en extremos opuestos y se les acopló un niple y codo para unir después mangueras flexibles. Se colocaron el espejo y la ventana de cuarzo con los sellos tipo *o'rings* atornillando con los dos restantes cuadros de acrílico. Estos *o'rings* deben llevar una capa delgada de grasa de silicón para asegurar el sellado. Los tornillos de sujeción proporcionan el ajuste fino de paralelismo entre la ventana y el espejo, utilizando para esto el haz de He-Ne de manera análoga al caso anterior.

Una de las salidas a manguera se cerró con un tapón y al otro extremo se le hizo vacío con la bomba mecánica para verificar que no hubiera fugas en la cavidad. Inicialmente es necesario evacuar por varias horas para eliminar el degase de las diversas componentes. El vacío debe mantenerse por varias horas después de cerrada la bomba. En caso de fugas, éstas pueden localizarse con aspersión de acetona (muy volátil) en las zonas probables de fracturas. Cuando la acetona penetra en las fracturas, la presión aumenta notablemente. Finalmente se colocaron las barras de aluminio con tornillos para sujetar firmemente la conexión con los capacitores. La cavidad terminada y sus detalles se muestran en las fotografías 1, 2, 3 y 4.



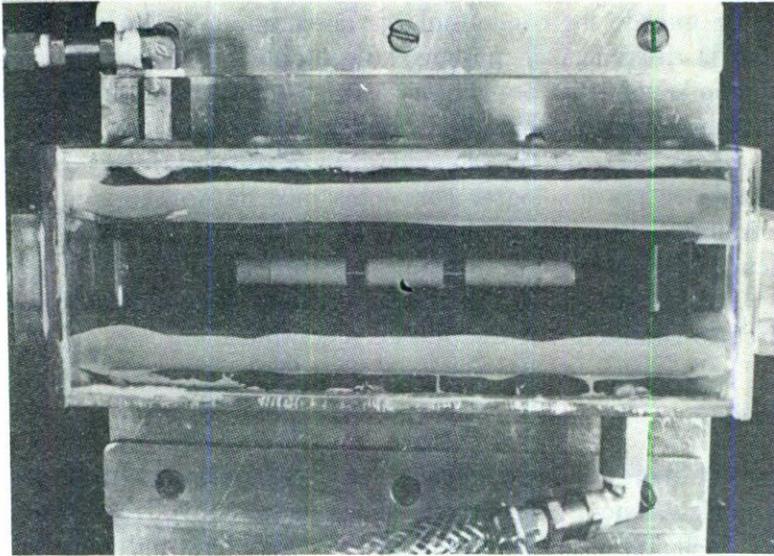
FOTOGRAFÍA 2. Detalle de la cavidad que muestra el sistema de alineación y la ventana de cuarzo.



FOTOGRAFÍA 3. Detalle de la cavidad que muestra un electrodo con sus barrenos para el flujo de gas y el espejo posterior.

#### 4. SISTEMA ULTRARRÁPIDO DE DESCARGA

Como ya mencionamos, un criterio importante para el diseño de un láser de nitrógeno es excitar tantas moléculas de nitrógeno como sea posible y hacer esto en menos de 47 nanosegundos por la duración de la inversión de población mencionada en la Sec. 2.2. Para ello, es utilizada una descarga de alta densidad de corriente. Hay diversos esquemas para producir altas densidades de corriente en descargas ultrarrápidas. Para minimizar el



FOTOGRAFÍA 4. Vista superior de la cavidad que muestra la bobina que acopla a los condensadores colocada en su parte inferior.

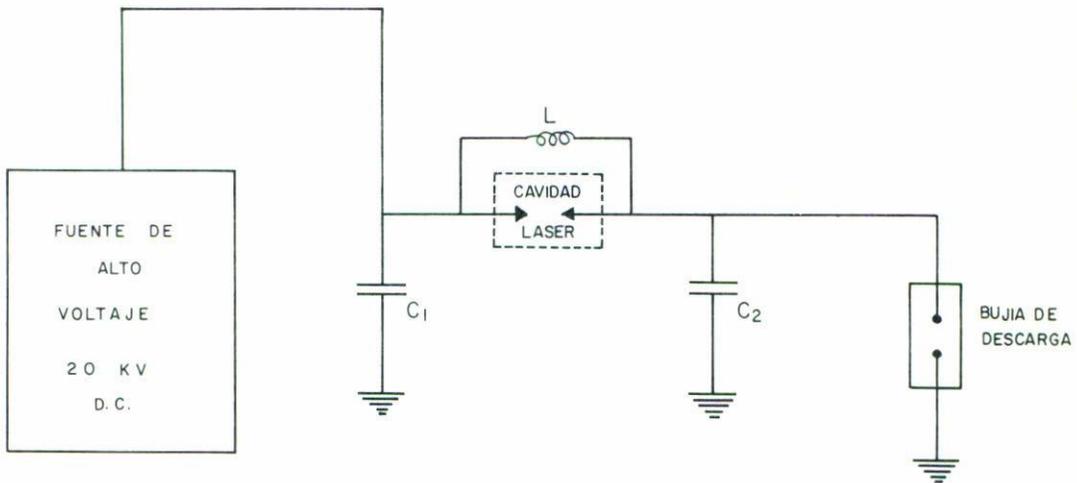


FIGURA 4. Circuito esquemático de tipo Blumlein para la generación de la descarga de alto voltaje.

tiempo de descarga se requiere minimizar la inductancia del circuito. La alta densidad de corriente se obtiene almacenando la energía eléctrica en condensadores de alto voltaje y baja inductancia.

El arreglo que hemos utilizado es conocido como circuito Blumlein y consiste en la transferencia resonante de carga entre dos condensadores a través de la cavidad láser (véase Fig. 4). El funcionamiento de este arreglo es el siguiente: Uno de los condensadores se carga mediante la fuente de alto voltaje rectificado, al tener los dos condensadores una placa común y una unión eléctrica a través de una inductancia, el otro condensador se carga al mismo voltaje. Un interruptor, en este caso una bujía de descarga, se usa

para cortocircuitar uno de los condensadores descargándolo. En ese momento, el otro condensador ante la diferencia de potencial resultante, transfiere su carga al primero. Aunque en principio la corriente podría fluir a través de la inductancia, esta se comporta como una impedancia infinita debido a la rapidez del proceso, por lo cual la descarga se conduce a través de los electrodos de la cavidad. Para voltajes típicos de 20 kV y circuitos de baja inductancia se pueden lograr corrientes pico de aproximadamente 2 kA. Este último valor se infiere del tiempo de descarga  $\delta t \approx 100$  ns y la capacitancia  $C = 12$  nF, pues del producto  $CV$  se obtiene la carga almacenada  $Q = CV$  y del cociente en tiempo la corriente  $I = \delta Q/\delta t \approx 2.4$  kA. Las características individuales de cada parte que componen el circuito Blumlein las describimos a continuación.

#### 4.1 Condensadores

El condensador es el lugar donde se almacena la energía eléctrica para después utilizarla en excitar a las moléculas de nitrógeno, este debe operar con voltajes pico de hasta 24 kV, tener una capacitancia del orden de nanofaradios y muy baja inductancia.

#### 4.2 Criterios de construcción y experiencia previa

Se empezó utilizando condensadores planos rectangulares hechos de lámina de aluminio con diferentes medios dieléctricos, llegando a determinar que el material que mejor servía como dieléctrico era el *mylar*. Se obtuvieron condensadores que tenían una duración media de 3 meses, tiempo después del cual el *mylar* era probable que se rompiera. La causa de esto se pensó, eran las burbujas de aire que quedaban entre el dieléctrico y la placa, que al ionizarse producían descargas las cuales iban desgastando al material hasta romperlo. Como solución se consideró eliminar las burbujas de aire colocando entre el dieléctrico y el metal grasa o resina, pero esto no mejoró su funcionamiento. Como otra solución se consideró que el dieléctrico tuviera adherida la placa de metal, lo cual se logró mediante la evaporación de aluminio para depositarlo sobre el dieléctrico. Dado el método usado, la placa de metal así obtenida era muy delgada y al probar los condensadores cargándolos a 20 kV, el metal depositado se fragmentó hasta desprenderse del dieléctrico.

Una solución que se encontró al problema sin entender la razón de ello, fue la de cubrir los condensadores con cajas de acrílico, lo cual aumentó su duración al triple. Dado que el tamaño de las cavidades fue en aumento, también así el de los condensadores, llegando a ser éstos los que mayor espacio ocupaban en el sistema ( $1 \text{ m}^2$  por condensador). Entonces se construyeron condensadores doblados que además de tener la capacitancia adecuada y baja inductancia, no fueron demasiado grandes. Comercialmente los condensadores de área grande (por ende alta capacitancia) se enrollan. Esta configuración introduce una inductancia desfavorable para una descarga rápida. En nuestro caso se dobló el condensador a manera de fuelle para compensar las inductancias generadas entre las placas. Su construcción se describe a continuación.

Los primeros condensadores que se construyeron tenían dimensiones de  $0.41 \times 0.16 \times 0.07$  m con capacitancia de 7 nF, con aluminio de  $1 \times 10^{-4}$  m de espesor. Se fueron doblando las láminas (*mylar* y papel aluminio) con una dobladora mecánica, debido a que el *mylar* utilizado fue muy grueso ( $4 \times 10^{-4}$  m) para doblarse manualmente. Se

colocaron placas de acrílico en cada doblez del condensador. A continuación se procedió a apretar el condensador con prensas mecánicas y se midió la capacitancia, con un puente de impedancias (marca HP, mod. 4265B), obteniéndose un valor aproximado de 7.44 nF. En estas condiciones se calentó lacre de modo que quedara líquido y se fue distribuyendo alrededor de los bordes del condensador para mantenerlo permanentemente doblado y con la capacitancia adecuada. Finalmente, una vez endurecido el lacre, se aflojaron las prensas.

Este tipo de condensadores resultaron ser muy útiles para nuestros propósitos, ya que tienen varias ventajas sobre los anteriores. Una ventaja es su tiempo de duración; otra ventaja importante es la reducción de las dimensiones del sistema láser y además el poder aumentar considerablemente la capacitancia sin aumentar demasiado las dimensiones del sistema. En experimentos realizados utilizando este tipo de condensadores en el sistema láser operando, se encontró una relación directa entre la capacitancia (y por lo tanto la potencia del pulso) y la fuerza con la que se mantiene apretado al condensador, es decir, la distancia entre las laminas de aluminio del condensador. Claramente se puede deducir que a mayor fuerza (menor distancia entre placas), mayor capacitancia. Esto nos planteó la posibilidad de poder ajustar la fuerza con la que apretamos los condensadores.

#### 4.2.1 Construcción de los condensadores más recientes

En esta construcción se realizaron algunas modificaciones con respecto a la construcción antes descrita, consistentes en emplear *mylar* de menor espesor ( $2 \times 10^{-4}$  m) para poder doblarlo manualmente, se evitó el uso de lacre y se empleó un dispositivo de prueba para poder apretar los condensadores. Se ajustaron las dimensiones del *mylar* y el aluminio para aumentar la capacitancia, aproximadamente a 12 nF en cada condensador.

Material utilizado para la construcción de los condensadores:

- 2 Láminas de papel aluminio de  $1 \times 10^{-4} \times 0.20 \times 1.98$  m.
- 2 Láminas de *mylar* de  $2 \times 10^{-4} \times 0.34 \times 2.08$  m.
- 9 Placas de acrílico de  $6 \times 10^{-3} \times 0.255 \times 0.34$  m.

De manera similar a la última construcción, se procede a doblar el *mylar* y el aluminio, sólo que ahora de manera manual. Se colocan placas de acrílico en cada doblez y en los extremos del condensador para evitar posibles saltos de corriente con los demás elementos del sistema láser. Cabe señalar que la construcción de esta manera es más rápida y accesible. En la Fig. 5 se muestra el condensador formado por las hojas de aluminio (encima y por abajo) y las de *mylar* (enmedio), antes y después de construido.

#### 4.3 Bujía de descarga

Se diseñó una bujía de descarga que pudiese ser ajustada en su funcionamiento como disparador y regulador de repetición (frecuencia de disparo). Con este propósito se permitió que la distancia entre las puntas fuese variable, de manera que a menor distancia, el voltaje de ruptura disminuye y la repetición aumenta. Por medio de un sistema de flujo de aire, se remueve el aire ionizado por el disparo para evitar descargas espurias. La presión de dicho flujo también modifica la repetición de los pulsos puesto que la constante dieléctrica de ruptura varía con la presión.

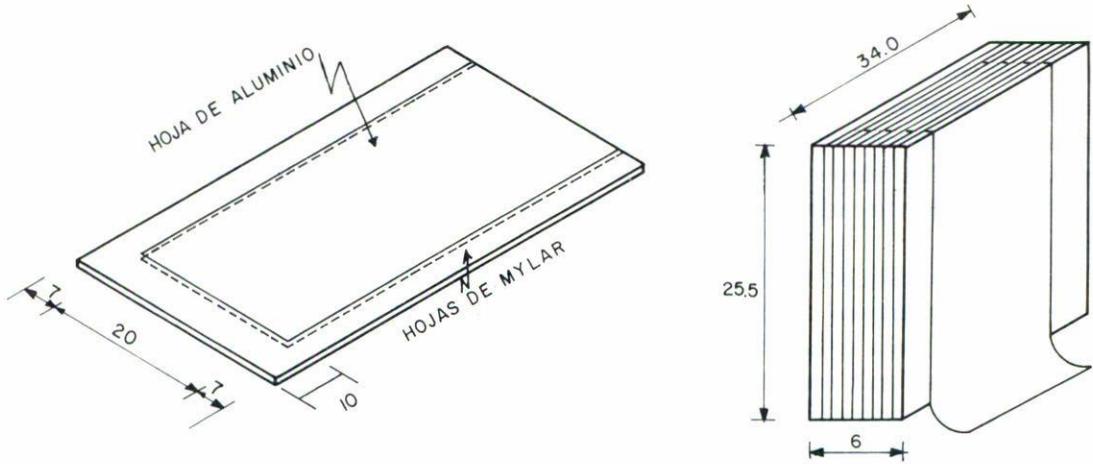


FIGURA 5. Vistas de un condensador. La figura de la izquierda muestra el detalle de un doblez, mientras que la parte derecha muestra el condensador completo. Unidades en centímetros.

#### 4.3.1 Construcción

Material utilizado para la construcción de la bujía de descarga:

- Barra de *nylamid* de 0.0508 m de diámetro.
- Barra de *nylamid* de 0.0254 m de diámetro.
- Barras y placas de latón y aluminio comercial.

Para poder variar la distancia entre las puntas de la bujía de descarga, a una de ellas se le hizo una cuerda de 12 hilos por pulgada. Esto permite variar la distancia entre puntas mediante una manija acoplada a esta punta, mientras la otra punta se mantiene fija. El sistema de flujo de aire se logró perforando la parte central del *nylamid* con dos barrenos en los cuales se acopló una espiga para permitir el paso del aire, este sistema se muestra en la figura 6. En diseños anteriores de bujías de descarga los barrenos para el flujo de aire no se practicaron en el *nylamid* sino en el metal donde se encontraba la punta fija.

#### 4.4 Bobina de acoplamiento

Se probaron diversas bobinas con inductancias varias. Inductancias muy pequeñas no permiten que la descarga principal se realice a través de la cavidad, mientras que inductancias mayores eventualmente permiten una filamentación de la descarga. Para operación óptima, se utilizó una bobina con ferrita de 6 mm de diámetro y 110 vueltas con alambre magneto calibre 24, con una inductancia de 0.3 mH. La bobina se colocó directamente en la parte inferior externa a la cavidad como se muestra en la fotografía 4.

#### 4.5 Fuente de alto voltaje

Se utilizó un circuito eléctrico para generar alto voltaje y limitar la corriente del secundario, pues en el momento de la descarga el circuito está efectivamente en corto.

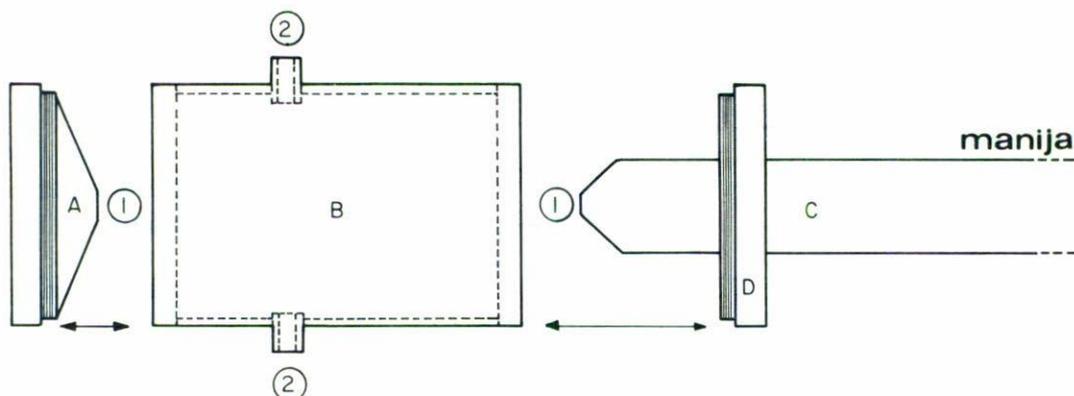


FIGURA 6. Vista lateral de la bujía de descarga. A-electrodo fijo, B-soporte aislante de *nylamid*, C-electrodo móvil, 1-puntas de descarga, 2-espigas para entrada y salida de aire.

Material utilizado en la construcción de la fuente de alto voltaje:

- 20 Resistencias de  $10\text{ k}\Omega$  con disipación de  $25\text{ W}$  de potencia.
- 4 Diodos *tecno-hut* alto voltaje de  $18\text{ A}$  (empleados generalmente en el circuito de *flyback* de televisores).
- 1 Interruptor  $6\text{ A}$ , 1 tiro, 1 polo.
- 2 Ferritas para bobina de  $7\text{ mm}$  de diámetro.
- 1 Transformador de  $17\text{ kV RMS}$ ,  $30\text{ mA}$ .
- 1 Transformador 1-1,  $10\text{ A}$ .
- Alambre de cobre calibre 24.
- 1 Autotransformador variable, entrada  $127\text{ V}$ , salida de  $0$  a  $140\text{ V}$ - $10\text{ A}$ .
- 1 Fusible y porta fusible  $10\text{ A}$ ,  $127\text{ V}$ .
- 3 Tramos de perfosel.
- 3 Tramos de acrílico.
- Cable blindado para alto voltaje.

#### 4.5.1 Modo de construcción

Se alimenta la línea a través del interruptor y el diodo al autotransformador el cual permite ajustar el voltaje de operación. Posteriormente se flota el circuito utilizando el transformador 1 a 1. Esta modificación permite aterrizar cualquiera de los polos de alto voltaje, la salida del transformador 1 a 1 alimenta el primario del transformador de alto voltaje. Al secundario se le limita en corriente colocando 2 bancos de 10 resistencias en serie montadas en perfosel para facilitar el disipamiento de calor; además se colocaron láminas de acrílico entre los bancos para evitar "saltos" de corriente entre las terminales de las resistencias. En otro perfosel, se hace un puente de rectificación de onda completa con los diodos de alto voltaje. La señal rectificada se conecta a unas bobinas de aislamiento (*chokes*) que impiden el regreso de picos negativos de corriente que se generan al

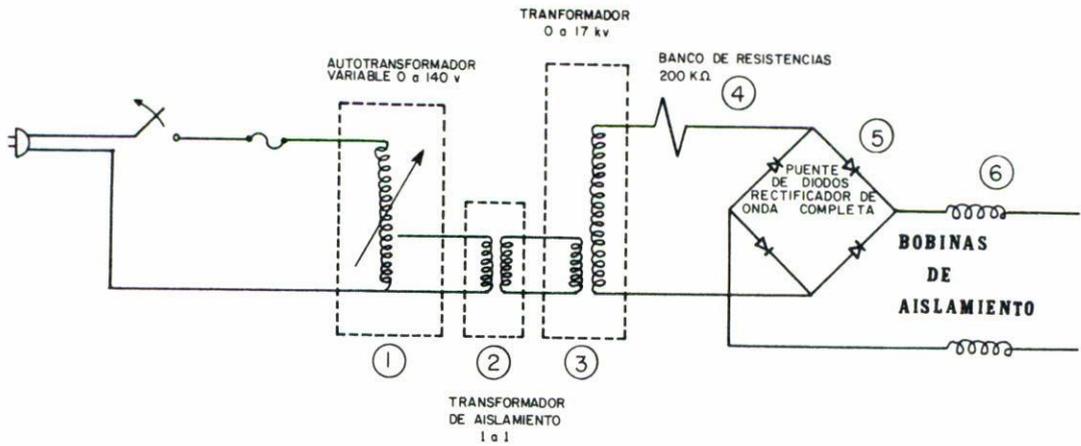


FIGURA 7. Circuito esquemático para la generación de alto voltaje. La salida, se conecta directamente a la bujía de descarga.

descargarse el láser. Esta precaución permite una vida mucho mayor a los diodos, pues su voltaje máximo de reversa es mucho menor que en la dirección de conducción. El circuito esquemático se muestra en la Fig. 7. Con esta configuración se obtiene voltaje de 0 a 17 kV RMS con corrientes de hasta 19 mA en el secundario. El voltaje al que se cargan los condensadores es el voltaje pico, en este caso, 0–24 kV.

### 5. MANEJO DE GASES

El flujo se puede lograr circulando el gas, lo cual requiere de una bomba de circulación, o simplemente inyectando gas de un reservorio y extrayéndolo con una bomba de vacío. Debido al bajo costo del nitrógeno esta última solución es la que comúnmente se adopta, pues la bomba de circulación del gas involucraría costos mucho más altos, sólo justificable cuando se usan gases más caros. Entre el tanque de nitrógeno y la cavidad se encuentra una válvula, con ésta se controla la cantidad de nitrógeno en la cavidad. Durante la optimización del sistema láser se probaron diversas válvulas, en el último prototipo se colocó una válvula de flujo fino ( $0.024 C_v$ ) de acero inoxidable, marca Hoke modelo 1315MAY.

Además, entre la cavidad y la bomba de vacío se colocó un manómetro marca Metrón de 0 a 76 cm de Hg con el cual podemos monitorear el cambio de presión en la cavidad.

Entre la toma de aire (instalada en el laboratorio) y la bujía de descarga se encuentra una válvula de flujo medio ( $0.35 C_v$ ) marca Hoke modelo 3752M4Y y un manómetro marca Metrón de 0 a 4 kg/cm<sup>2</sup> con los cuales podemos monitorear la presión de aire en la bujía de descarga. El flujo de aire a través de la bujía de descarga se puede lograr también con un compresor de aire. Otra forma de evitar descargas espurias como se menciona en la Sec. 4.3 es hacer fluir nitrógeno a través de la bujía de descarga con un tanque convencional.

Todas las conexiones están hechas por medio de manguera tipo *nyloplex* no colapsable de  $7.93 \times 10^{-3}$  m de diámetro, excepto para el flujo de aire en donde se empleó manguera sencilla transparente de igual diámetro, acopladas con espigas; en estas uniones colocamos abrazaderas con el propósito de no tener entrada de aire que reduzca el vacío producido por la bomba. Entre las conexiones metálicas se coloca cinta de teflón. Mediante este tipo de medidas hemos conseguido que el vacío en la cavidad sea mantenido por 24 horas aproximadamente. Se empleó una bomba mecánica para realizar el vacío con las siguientes especificaciones: velocidad de desplazamiento en vacío 60 L/min, presión de 0.1 millitorr. Se empleó un tanque para nitrógeno con capacidad de 6 m<sup>3</sup>.

## 6. CARACTERÍSTICAS DEL LÁSER

Tipo de láser: Láser gaseoso molecular intrínsecamente pulsado.

Frecuencia de emisión: 337.1 nm.

Longitud de coherencia:  $10^{-3}$  m.

Energía por pulso: 0.7 mJ (promedio).

Ancho temporal del pulso (FWHM): 6 ns.

Potencia por pulso: 115 kW (pico-promedio).

Variación de potencia entre pulsos: 10%.

Repetición de los pulsos: 0-5 Hz (variable).

Sección transversal del pulso:  $0.01 \times 0.02$  m.

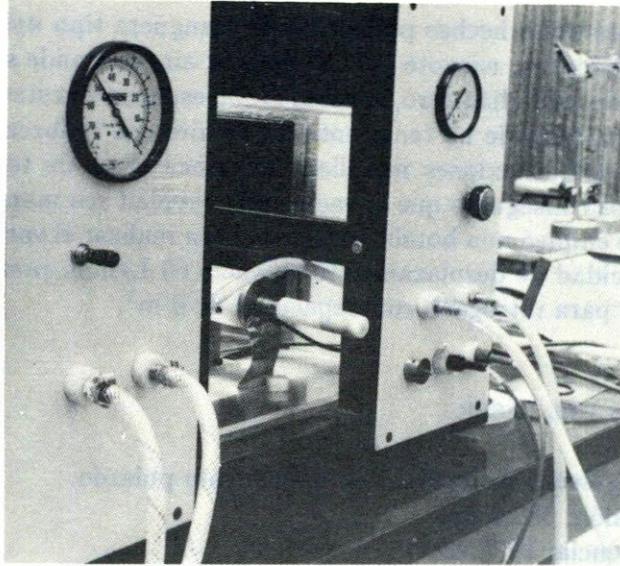
Eficiencia electro-óptica:  $3 \times 10^{-4}$ .

La eficiencia electro-óptica se define como la razón de la energía óptica de los pulsos entre la energía eléctrica acumulada en el condensador de descarga. La energía del pulso se midió con un medidor de energía Gentec modelo PRJ-D. El ancho temporal se midió con un osciloscopio tektronix modelo 485/R485 y un fotodiodo tipo PIN Hamamatsu modelo S1722-02. La coherencia se midió con un interferómetro de Michelson marca Beck modelo M300/6407.

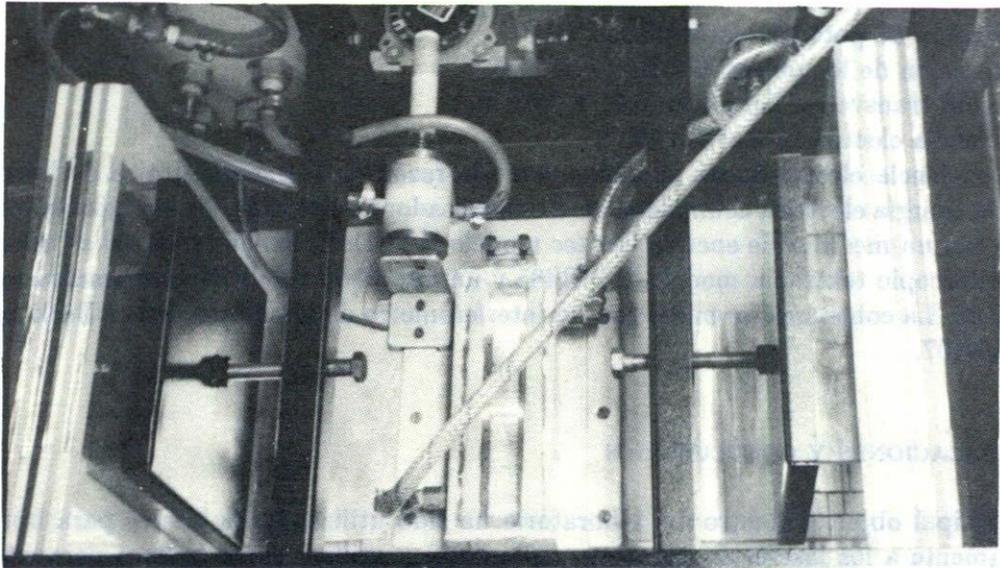
## 7. APLICACIONES Y CONCLUSIONES

El principal objetivo dentro del laboratorio ha sido utilizar estos láseres para bombear ópticamente a los láseres de pigmento (colorante) y utilizar estos últimos para estudiar fenómenos ópticos no-lineales. Entre las aplicaciones de estos láseres que hemos realizado están la fabricación de hologramas pulsados de objetos en movimiento [16], la generación de segundo armónico [17], el daño generado en monocristales de NaCl:Eu por irradiación con luz láser de nitrógeno [18] y la de irradiar muestras de halogenuros alcalinos dopados con europio o manganeso para medir tiempos de vida media de ciertos niveles excitados del cristal.

El cabezal prototipo más reciente se ha colocado en un gabinete de  $0.67 \times 0.50 \times 0.45$  m que permite su operación segura y posibilidad de transporte. En la fotografía 5 se muestra el panel de control (sin una cubierta del gabinete). El control de flujo de nitrógeno se monitorea del lado izquierdo y el del flujo de aire del lado derecho. Las conexiones a la fuente de

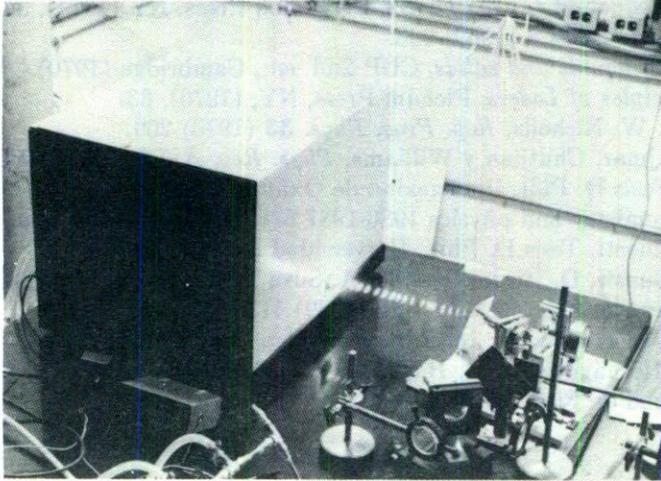


FOTOGRAFÍA 5. Panel de control del láser en la parte posterior del cabezal.



FOTOGRAFÍA 6. Detalle del gabinete abierto visto desde arriba.

alto voltaje se pueden apreciar en el extremo inferior derecho. La fotografía 6 es una vista superior del gabinete en donde se puede ver la cavidad y la bujía de descarga al centro, y los condensadores doblados en los extremos laterales, con su dispositivo *in situ* para apretarlos. La fotografía 7 muestra el láser en operación. La fuente de voltaje se encuentra en un gabinete independiente, el tanque y la bomba de vacío son externos al sistema. Su funcionamiento durante dos años ya en el gabinete, ha sido adecuado y solamente ha requerido reparación del dieléctrico de los condensadores en tres ocasiones durante este lapso.



FOTOGRAFÍA 7. Láser en operación.

El costo actual del cabezal prototipo que se muestra en la fotografía 7, es de aproximadamente dos millones de pesos. Si agregamos los costos de la fuente de alto voltaje, la bomba de vacío y el tanque de nitrógeno el costo aproximado es de cinco millones. Todo esto sin considerar los diferentes trabajos de taller mecánico (maquinados, fresados, etc.) ya que la mayoría de estos se realizaron dentro de la universidad.

En nuestra experiencia, la construcción y operación de un láser de este tipo es sencilla, sin embargo el proceso de optimización y operación confiable de estos sistemas es un proceso prolongado situado en la frontera de la investigación y el desarrollo. Este proceso, frecuentemente inexistente en nuestro país, ha contribuido en nuestra opinión a la falta de vinculación entre la investigación y los sectores productivos.

#### AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la colaboración desinteresada del Sr. A. Estrada por la fabricación de depósitos de aluminio sobre *mylar* descritos en la Sec. 4.2. Este proyecto fue apoyado en diversas etapas por la SEP y el CONACYT. Nuestro colega y excelente amigo Juan Martínez Sisniega, colaboró en el desarrollo de este proyecto y deseamos expresar nuestro amplio reconocimiento a su valiosa labor.

#### REFERENCIAS

1. H.G. Heard, *Nature* **200** (1963) 667.
2. D.A. Leonard, *Applied Physics Letters* **7** (1965) 4.
3. V.J. Pinto y V. Aboites, *Rev. Mex. Fís.* **37** (1991) 665.
4. A. Porta y S. Godoy, *Instrumentación y Desarrollo* **1** (1982) 2.

5. V. Aboites y V.J. Pinto, *Rev. Mex. Instr.* **2** (1990) 22.
6. J. Garduño y M. Villagrán, 3M51, Congreso XXXIV, SMF (1991).
7. C.S. Willet, *Introduction to Gas Lasers*, Pergamon Press, NY (1974), 342.
8. A.W. Ali, *Applied Optics* **8** (1969) 993.
9. D. Tabor, *Gases, liquids and solids*, CUP 2nd. ed., Cambridge (1970).
10. O. Svelto, *Principles of Lasers*, Plenum Press, NY, (1976), 83.
11. J. Anketell y R. W. Nicholls, *Rep. Prog. Phys.* **33** (1970) 269.
12. Cartwright, Trajmar, Chutjian y Williams, *Phys. Rev. A* **16** (1977) 1045.
13. A.J. Kearsley, Tesis D. Phil. Universidad de Oxford (1980).
14. Handbook of chemistry and physics 1986-1987 67<sup>th</sup> edition, CRC Press, Inc.
15. M. Fernández Guasti, Tesis D. Phil., Universidad de Oxford (1983).
16. M. Fernández Guasti, D. Iturbé Castillo, A. Silva Pérez, A. Gil Villegas, H. González Torres y R. López Guerrero, *Rev. Mex. Fís.* **35** (1989) 410.
17. M. Fernández Guasti y Raúl Rangel R., *Rev. Mex. Fís.* **37** (1991) 309.
18. A. Silva P., J. Hernández A., E. Haro, M. Fernández y J. Rubio O., Memorias del XXXII Congreso Nacional de Física, SMF (1989).