

# El efecto optogalvánico como detector de la potencia irradiada por láseres de CO<sub>2</sub> de alta potencia de flujo rápido transversal

The optogalvanic effect as a power detector for high-power, fast-transverse-flow CO<sub>2</sub> lasers

G. D. Santiago\*<sup>1</sup>, V. D'Accurso†,

\*Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería,  
Grupo de Láser, Óptica de Materiales y Aplicaciones Electromagnéticas (GLOMAE)  
Paseo Colón 850, C1063ACV, Buenos Aires, Argentina

†Centro de Investigaciones en Láseres y Aplicaciones, CITEDEF  
Juan Bautista de la Salle 4397, B1603ALQ, Buenos Aires, Argentina

<sup>1</sup>gsantia@fi.uba.ar

Recibido: 23/05/18; Aceptado: 08/06/18

**Abstract**—In this work, a new method for measuring the power of light beams generated by fast-transverse-flow CO<sub>2</sub> lasers is presented. It consists in measuring the temperature of the gas before and after the discharge zone under the conditions when the output mirror of the optical cavity is blocked or not. Then, using a simple thermodynamic model, the emitted power is obtained. The method was tested in a continuous CO<sub>2</sub> laser of the convective cooling type by transverse flow that can deliver a power up to 2 kW. The measured power agreed very well with that obtained with a commercial detector based on an absorbing material.

**Keywords:** CO<sub>2</sub> laser; high power; fast transverse flow

**Resumen**— En este trabajo se presenta un nuevo método para medir la potencia de haces de luz generada por láseres de CO<sub>2</sub> de flujo rápido transversal. Éste consiste en la medición de la temperatura del gas antes y después de la zona de descarga en las condiciones cuando el espejo de salida de la cavidad óptica se encuentra o no bloqueado. Luego, usando un modelo termodinámico sencillo, se obtiene la potencia emitida. El método fue probado en un láser de CO<sub>2</sub> continuo del tipo de enfriamiento convectivo por flujo transversal que puede entregar hasta 2 kW. La potencia medida concordó muy bien con aquella obtenida con un detector comercial basado en un material absorbente.

**Palabras clave:** Láser CO<sub>2</sub>; alta potencia; flujo rápido transversal

## I. INTRODUCCIÓN

El láser de CO<sub>2</sub> ha sido muy estudiado ya que presenta un gran rendimiento y se pueden conseguir potencias muy elevadas. Éste tipo de láser es utilizado en numerosas aplicaciones, como por ejemplo en la manufactura industrial, reacciones fotoquímicas, soldado y cortado de diversos materiales, entre otras. Esta gran variedad de aplicaciones abrió el camino al desarrollo de láseres de CO<sub>2</sub> operados en forma continua, que trabajan con potencias del orden de los kilowatts y los operados en forma pulsada que llegan a alcanzar los terawatts.

Una gran ventaja de éste láser se encuentra en la molécula de CO<sub>2</sub> que lo caracteriza. Dada la simetría lineal de la misma y encontrándose en una mezcla CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>:He, los niveles vibro-rotacionales relevantes de la molécula de

CO<sub>2</sub> virtualmente coinciden con los estados de energía vibracional característicos de del nitrógeno. Esta propiedad permite que el N<sub>2</sub> transfiera al CO<sub>2</sub> energía vibracional por colisiones, optimizando de esta forma el proceso de bombeo de las moléculas al nivel láser superior. De esta forma el láser de CO<sub>2</sub> puede alcanzar un rendimiento muy alto, del orden de 20% de conversión de potencia eléctrica a potencia óptica.

Existen diversos mecanismos para excitar estos láseres, siendo los más utilizados las descargas de corriente continua o pulsada.

A pesar del buen rendimiento de este láser, más del 80% de la potencia de excitación debe ser extraída bajo a forma de calor. Este punto se vuelve más difícil de resolver cuando las potencias láser son del orden del kilowatt. En efecto, la temperatura de la mezcla de CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>:He conviene que sea inferior a unos 450 K para evitar la degradación de la ganancia del láser. De hecho, el método para disponer del calor caracteriza a los láseres de gran potencia, siendo los dispositivos llamados de “enfriamiento convectivo” o también de “flujo rápido”, la solución más empleada. La idea básica es la de circular rápidamente la mezcla de gases a través de la zona de descarga de forma tal que el calor sea removido por enfriamiento convectivo.

Medir la potencia de un haz láser es difícil. Hay casi tantos tipos diferentes de medidores como láseres, y ninguno de ellos es barato. El método estándar para medir la potencia de un haz láser es calentando un detector. Luego, esa potencia se compara con la cantidad equivalente de energía eléctrica que causaría un cambio de temperatura equivalente. El detector generalmente tiene un revestimiento especial para absorber la energía del haz y suele tardar unos segundo o incluso minutos en integrar la señal.

Usualmente la potencia de un láser continuo es medido con algún método térmico en el que la temperatura del sensor aumenta por la absorción del haz láser y como consecuencia alguna propiedad eléctrica varía (termoresistencias, termocuplas) y a partir de éstas se computa la potencia láser. Es complejo aplicar este método con potencias del orden del kilowatt porque, a diferencia de lo que ocurre

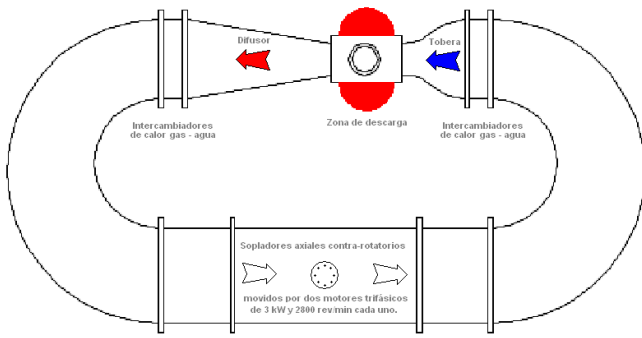


Fig. 1. Esquema de un láser de CO<sub>2</sub> de enfriamiento convectivo por flujo rápido transversal.

en radiofrecuencias, no es sencillo ni económico tomar una muestra calibrada del haz láser, por lo que un detector láser de altas potencias debe ser capaz de absorber la totalidad de la potencia incidente. Esto obliga a emplear refrigeración por agua o grandes disipadores.

En este trabajo presentamos un método para medir la potencia de haces de luz generados por láseres de CO<sub>2</sub> de alta potencia de flujo rápido transversal basado en el efecto optogalvánico y unas simples consideraciones termodinámicas. La técnica fue probada experimentalmente y contrastada con el valor obtenido con un detector comercial basado en un absorbente calibrado.

## II. MÉTODO Y MATERIALES

El método presentado en este trabajo se probó en un láser de CO<sub>2</sub> continuo del tipo de enfriamiento convectivo por flujo rápido transversal que fue usado en varios trabajos previos [1]–[3]. En la Fig. 1 se muestra el esquema del láser en cuestión.

El sistema por el que circula la mezcla es una estructura construida en acero y que semeja un túnel aerodinámico. Los gases son recirculados por un par de soplores axiales contra-rotatorios movidos por dos motores trifásicos de 3 kW cada uno. La mezcla es acelerada hasta una velocidad de 50 m/s en una tobera para luego ingresar a la zona de descarga de 1000 mm de ancho y 100 mm de altura, donde es excitada por medio de una descarga de corriente continua de alta potencia. Luego de salir de la zona de descarga los gases reducen la velocidad en un difusor, cerrando así el circuito de circulación. Una pequeña parte de la potencia disipada es útil para proveer ganancia y el resto (del orden del 90% del total) es extraído en un par de intercambiadores de calor gas-agua ubicados antes y después de la zona de descarga. Estos intercambiadores sirven también para remover el calor disipado en los motores de circulación dado que los mismos carecen de un sistema de refrigeración independiente. La excitación se consigue por medio de una fuente trifásica capaz de entregar de 2.5 a 3.3 kV y corrientes de hasta 20 A. La tensión de salida se ajusta por medio de un auto-transformador.

El sistema de excitación posee el formato simple de la Fig. 2. El cátodo es un caño de cobre de 20 mm de diámetro y por su interior circula agua que ayuda a disipar el término de potencia correspondiente a la caída catódica. Los ánodos son barras semicilíndricas de bronce de 13 mm de ancho,

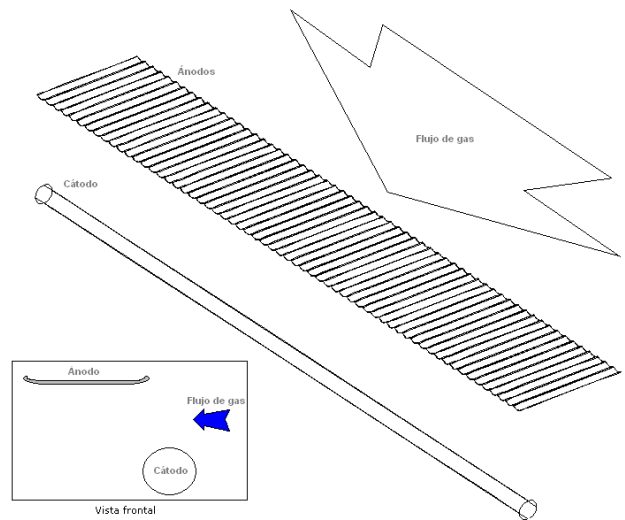


Fig. 2. Configuración de electrodos del esquema de excitación.

80 mm de largo y suman un total de 60. Estos se encuentran ubicados paralelamente entre ellos y al flujo del gas, con lo que se consigue una zona excitada de 900 x 80 x 45 mm. Cada ánodo se encuentra conectado a la fuente a través de una resistencia limitadora individual.

Para medir la potencia recurrimos al efecto optogalvánico [4]. Descripto sintéticamente, este fenómeno se caracteriza por la variación de la impedancia de una descarga gaseosa cuando es iluminada con luz resonante con alguna de las transiciones permitidas de las moléculas presentes. Desde el punto de vista del circuito externo se observa una disminución de la caída de voltaje a través de la descarga cuando se mantiene constante la corriente. En nuestro caso utilizamos la radiación láser presente dentro de la zona de descarga para obtener el efecto optogalvánico. Si se inhibe la oscilación (tapando el espejo de salida), la caída de voltaje es superior a la que se registra cuando hay oscilación (a corriente constante). Esto indica que se entrega menos potencia a la descarga, lo que se traduce en un

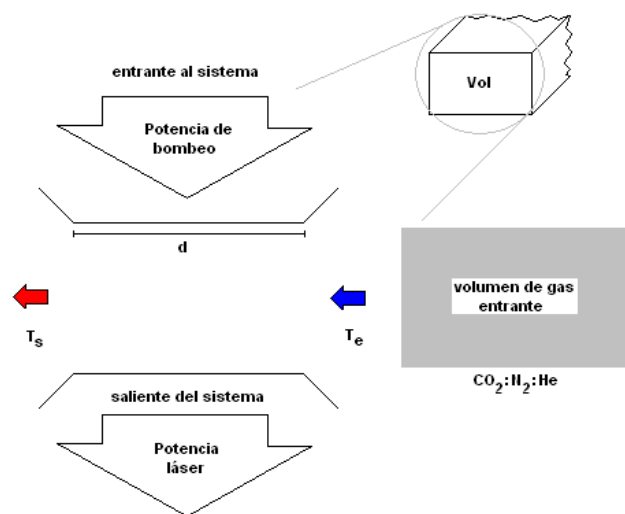


Fig. 3. Modelo termodinámico de la cavidad láser.

menor aumento de temperatura de los gases que atraviesan la zona de excitación. El método para medir la potencia láser irradiada consiste en la medición de la temperatura del gas antes y después de la región donde se produce la descarga gaseosa para los casos con y sin bloqueo del espejo de salida. La medición de la temperatura se consigue con un arreglo compuesto por varios termistores (135-104LAG-J01) dispuestos en un plano transversal a la dirección del flujo. Para obtener la potencia a partir de la medición de la temperatura se sigue el modelo termodinámico mostrado en la Fig. 3. El primer principio aplicado a sistemas con flujo entre el plano de entrada (e) y el de salida (s) puede ser escrito como:

$$C_p \dot{m} (T_s - T_e) + \frac{1}{2} \delta_s A v_s^2 - \frac{1}{2} \delta_e A v_e^2 = P_{elec} \quad (1)$$

donde  $C_p$  el calor específico a presión constante por unidad de masa,  $\dot{m}$  el caudal másico,  $\delta$  la densidad del gas,  $v$  la velocidad de flujo,  $T$  la temperatura absoluta del gas y  $P_{elec}$  la potencia eléctrica entregada a la descarga. Los subíndices  $e$  y  $s$  corresponden a los valores antes y después de la zona de descarga, respectivamente. En las condiciones prevalecientes en nuestro caso los términos asociados con la energía cinética son despreciables, por lo que obtenemos:

$$P_{elec} = C_p \dot{m} (T_s - T_e) \quad (2)$$

Como la temperatura a la entrada de la descarga no depende de si el espejo de salida se encuentra o no bloqueado, la potencia láser se puede calcular con la diferencia de las potencias eléctricas depositadas sin y con efecto optogalvánico presente:

$$P_{laser} = C_p \dot{m} (T_s^c - T_s^s) \quad (3)$$

donde los supraíndices  $c$  y  $s$  corresponden a con y sin bloqueo de espejo de salida, respectivamente.

Es importante recalcar que  $T_s^c > T_s^s$  debido a la existencia (o no) del efecto optogalvánico cuando se bloquea o habilita el espejo de salida, respectivamente.

### III. RESULTADOS

La Fig. 4 presenta una vista de la descarga. A la izquierda de la misma se observa el cátodo tubular iluminado fuertemente por la mancha catódica. En la parte superior se encuentran los ánodos y próxima a ellos se observa una zona luminosa correspondiente a la columna positiva. El gas fluye de izquierda a derecha y se puede apreciar el fuerte desplazamiento de la descarga en tal dirección.

En la Fig. 5 se muestra el valor promedio de la temperatura del gas a la salida de la descarga con y sin bloqueo del espejo de salida. La presencia de dos picos se corresponde a siguiente secuencia de medición: 1) se enciende fuente; 2) medición temperatura; 3) se apaga fuente de alimentación y se bloquea el espejo de salida; y 4) se mide temperatura. Del primer pico se puede decir que suponiendo un bombeo directo al nivel inferior despreciable, la población de este aumenta rápidamente con el crecimiento de la temperatura del gas dado que la energía del nivel  $10^0$  es tan sólo 1388

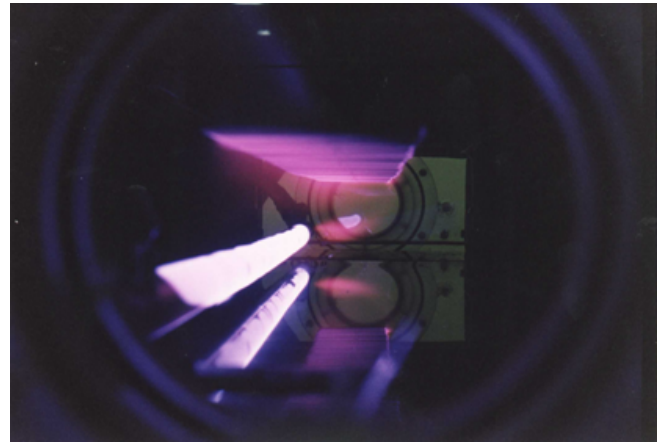


Fig. 4. Fotografía de la descarga en la cavidad óptica sin espejos.

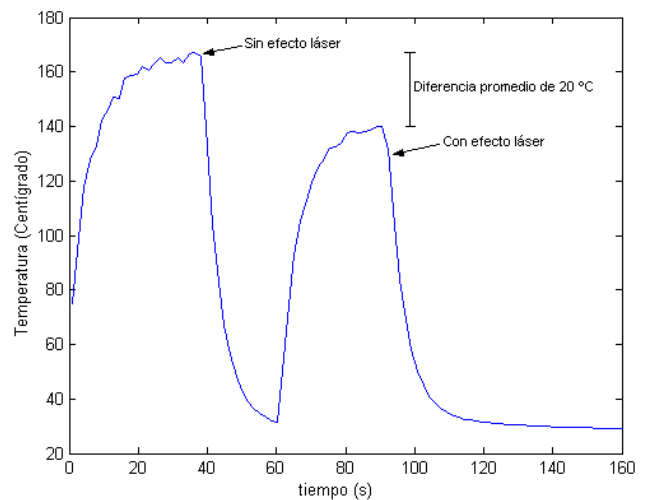


Fig. 5. Temperatura del gas a la salida de la zona de descarga.

$\text{cm}^{-1}$ , que comparada con un valor de  $280 \text{ cm}^{-1}$  para  $kT$  a  $T = 400 \text{ K}$  indica que la población del nivel inferior crece drásticamente al elevarse al temperatura, con la siguiente disminución de la ganancia del medio. Resulta por lo tanto importante mantener la temperatura del gas por debajo de los  $450 \text{ K}$ . Es sabido que al aumentar la corriente se produce un aumento de la temperatura, entonces observando la Fig. 5 se puede predecir si todavía es posible aumentar la corriente. Se observa que la temperatura de la descarga comienza en  $418 \text{ K}$  y asciende a los  $440 \text{ K}$ , por lo tanto todavía se posee un resto de  $10 \text{ K}$  para aumentar la corriente sin afectar notablemente la inversión de población. A partir de la medición de la temperatura a la entrada de la descarga, se verificó que la temperatura del gas a la entrada de la descarga es independiente de si el espejo de salida de la cavidad óptica está o no bloqueado.

La medición de temperatura se realizó con una mezcla 1:3:17 a una presión total de  $37.5 \text{ torr}$  y con lo que se obtiene un valor para  $C_p \delta \approx 44 \text{ J}/(\text{K m}^3)$ . Considerando  $A = 31.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$  y  $v = 50 \text{ m/s}$  se obtiene una potencia de  $1386 \text{ W}$ . Con el detector calibrado se obtuvo un valor de  $1400 \text{ W}$ .

#### IV. CONCLUSIONES

En este artículo se presentó una nueva forma de medir la potencia emitida por láseres continuos de CO<sub>2</sub> de alta potencia de flujo rápido transversal. La misma se basa en el uso de dos arreglos de termistores para medir la temperatura promedio de la mezcla gaseosa CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>:He antes y después de la zona donde ocurre la descarga eléctrica que genera la inversión de población. Esto se realiza para las condiciones con y sin bloqueo del espejo de salida de la cavidad láser y, usando un modelo termodinámico sencillo, se obtiene la potencia irradiada.

El método fue probado en un CO<sub>2</sub> continuo usado en varios trabajos previos y que es capaz de entregar hasta 2 KW de potencia. Se midió una potencia de 1386 W, que es un valor que concuerda muy bien con el obtenido con un detector comercial calibrado basado en un material absorbente.

#### REFERENCIAS

- [1] M. G. Gonzalez, I. Rios, V. D'Accurso, G. D. Santiago, and C. Rosito, "Homogeneización del bombeo en láseres de co<sub>2</sub>, de flujo rápido transversal," *Anales AFA*, vol. 14, pp. 76–78, 2002.
- [2] M. G. Gonzalez and G. D. Santiago, "Operational characteristics of different electrode systems in fast- transverse-flow co<sub>2</sub> lasers," *Proc. SPIE*, vol. 5622, pp. 261–266, 2004.
- [3] M. G. Gonzalez, I. Rios, V. D'Accurso, G. D. Santiago, and C. Rosito, "An analytical approach to the design of electrodes in high-power, fast-transverse-flow co<sub>2</sub> lasers," *Opt. Laser Technol.*, vol. 37, pp. 615–622, 2005.
- [4] M. B. J. Pfaff and R. Saykally, "An investigation of the laser optogalvanic effect for atoms and molecules in recombination-limited plasmas," *Mol. Phys.*, vol. 52, pp. 541–566, 1984.