

# MONTAJE DE INTERFEROMETRO DE NOMARSKY PARA CARACTERIZAR PROCESOS DE PROPULSION POR ABLACION LASER

## IMPLEMENTATION OF A NOMARSKY INTERFEROMETER FOR THE CHARACTERIZATION OF ABLATIVE LASER PROPULSION PROCESSES

C. Toro <sup>a,\*</sup>, C. Rinaldi <sup>b,c</sup>, M. L. Azcárate <sup>a,c</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Investigaciones en Láseres y Aplicaciones, CITEDEF- UNIDEF (MINDEF-CONICET) San Juan Bautista de La Salle 4397 – (B1603ALO) Villa Martelli – Prov. Buenos Aires – Argentina

<sup>b</sup> Departamento de Micro y Nanotecnología - Centro Atómico Constituyentes - Comisión Nacional de Energía Atómica. Av. Gral Paz 1499 (1650) San Martín – Prov. Buenos Aires – Argentina

<sup>c</sup> Carrera del Investigador de CONICET

Recibido: 17/11/17; aceptado: 13/03/18

En este trabajo se presenta la implementación de un interferómetro de Nomarsky diseñado para medir el impulso específico de combustibles utilizados en sistemas de propulsión por ablación láser. En primer lugar se validó la técnica con combustibles conocidos. Posteriormente, se aplicó a la medición del impulso específico de combustibles binarios metal/sal desarrollados por nuestro grupo de investigación [1]. Esto permitió a su vez, determinar la eficiencia de dichos combustibles.

*Palabras clave:* interferometría, propulsión láser, ablación láser, impulso específico, nanosatélites.

In this paper the implementation of a Nomarsky interferometer designed for the measurement of the specific impulse of propellants used in laser ablative propulsion are presented. The technique was first validated with known propellants. Subsequently, it was applied to the measurement of the specific impulse of binary metal/salt propellants developed by our research group [1]. This allowed the efficiency of these propellants to be determined.

*Keywords:* interferometry, laser propulsion, laser ablation, specific impulse, nanosatellites.

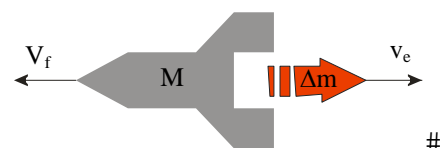
### I. INTRODUCCIÓN

#### I.1 Propulsión por Ablación Láser

En los últimos años se ha venido estudiando la propulsión por ablación láser (PAL) para ser utilizada en el control seguro y preciso de la orientación y las órbitas de nanosatélites. La PAL es un proceso en el cual un pulso láser extrae o vaporiza material de la superficie de un combustible sólido. El láser debe enfocarse sobre un área pequeña a fin de alcanzar la energía necesaria para producir ablación. La materia ablacionada sale, con dirección en el plano perpendicular a la superficie, como un chorro de gas de forma ovalada, a menudo incandescente, que recibe el nombre de pluma de ablación ó pluma. El empuje que se produce pulso a pulso debido a la eyección direccionada de materia, impulsa y dirige al satélite sin la necesidad de toberas (ver Figura 1, su epígrafe y las Ecuaciones (1) y (2)) [1-3].

En estos sistemas de propulsión las figuras de mérito relevantes son el impulso específico,  $I_e$  (impulso producido por unidad de peso de combustible consumido) y el coeficiente de acoplamiento,  $C_m$

(impulso por unidad de energía del láser) definidos por las ecuaciones (3) y (4), respectivamente.



$$\Delta P|_{\text{satélite}} = \Delta P|_{\text{pluma}} \quad \# \quad (1)$$

$$M \cdot \Delta V = \Delta m \cdot v_e \quad (2)$$

$$C_m = \Delta P|_{\text{satélite}} / E = M \Delta V / E = M V_f / E \quad (3)$$

$$I_e = \Delta P|_{\text{pluma}} / \Delta m \cdot g = \Delta m \cdot v_e / \Delta m \cdot g = v_e / g \quad (4)$$

*Figura 1. Esquema de aplicación de momentos para definir el  $C_m$  y el  $I_e$ .*

$V_f$  es la velocidad final que alcanza el satélite luego del impulso,  $\Delta V = V_f - V_0 = V_f$  pues inicialmente tiene  $V_0 = 0$  m/s.

$v_e$  es la velocidad de eyección del material ablacionado [2].

$M$  es la masa del nanosatélite, 1 – 10 Kg.

$\Delta m$  es la masa de combustible ablacionada en un pulso.

$\Delta P$  es la variación de cantidad de movimiento en un pulso.

\* [ctoro@citedef.gob.ar](mailto:ctoro@citedef.gob.ar)

En general, el  $C_m$  puede determinarse directamente, por ejemplo, midiendo  $V_f$  con un péndulo de torsión [1]. El  $I_e$  usualmente se calcula a partir del  $C_m$  y de  $Q^*$  definida como la energía del láser consumida por unidad de masa ablacionada en cada pulso [2, 3]:

$$I_e = C_m Q^* \quad (5)$$

Sin embargo, como  $Q^*$  es del orden de los nanogramos resulta muy difícil de medir para pulsos únicos. Por ello, suele determinarse a partir de los cráteres producidos por una gran cantidad de pulsos láser. Esta promediación de la masa eyectada conduce a una mayor incerteza en el valor de  $I_e$ .

Debe tenerse en cuenta, por otra parte, que los dos elementos de los pares  $(C_m, Q^*)$  y  $(C_m, I_e)$  no son independientes [2]. Esto conduce a la definición del parámetro de la eficiencia de ablación láser:

$$2\eta_{AL} = C_m v_e = g C_m I_e \quad (6)$$

que es la eficiencia con la que la energía del láser,  $E$ , se convierte en energía cinética de eyección del material.

En este trabajo se presenta una técnica óptica que permite la medición directa de  $I_e$ , pulso a pulso, a partir de la determinación de  $v_e$  de la pluma. En la sección I.2 se hará referencia al método utilizado.

## I.2 Métodos de Diagnóstico de Plumas de Ablación Láser

El conocimiento detallado y exhaustivo de las distribuciones espaciales y de la forma en que la pluma de ablación evoluciona en el tiempo, puede ayudar a determinar su densidad, temperatura, y otros parámetros del plasma como la velocidad de eyección de las partículas que lo componen. Para obtener estas distribuciones experimentalmente se vienen utilizando métodos ópticos, como la fotografía de sombras y la interferometría, siendo esta última la que mayor información proporciona [4, 5].

De los interferómetros de Mach-Zender [6] y de Nomarsky utilizados en nuestro grupo se eligió este último debido a que es compacto, fácil de alinear y permite variar la densidad de franjas de interferometría en forma eficiente dentro del área de detección de un detector CCD [7]. El corazón del interferómetro de Nomarsky es el biprisma de Fresnel cuya función es la división del frente de onda del haz utilizado para diagnóstico (ver Figura 2).

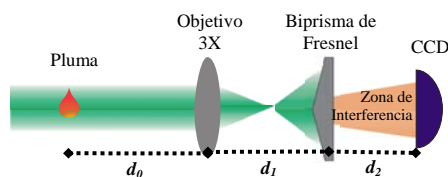


Figura 2. Principio de funcionamiento del Interferómetro de Nomarsky [7].

$d_0$ : distancia desde la pluma a la lente

$d_1$ : distancia de la lente al biprisma

$d_2$ : distancia total del biprisma a un detector CCD

Y para conseguir resolución temporal en el análisis de la pluma es preciso sincronizar: los láseres de ablación y diagnóstico, y el detector CCD. Esto permite analizar la expansión de la pluma con ventanas temporales de duración igual a la duración del pulso del láser de diagnóstico, 8 ns.

De acuerdo a lo analizado en las Secciones I.1 y I.2, en este trabajo se presenta el diseño y la implementación de un Interferómetro de Nomarsky [7] así como su validación a través del estudio de combustibles conocidos. También se presenta la determinación del  $I_e$  y la  $\eta_{AL}$  de combustibles consistentes en mezclas binarias metal/sal desarrollados por nuestro grupo [1].

## II. EXPERIMENTAL

### II.1 Hardware: Interferómetro de Nomarsky implementado

El biprisma de Fresnel utilizado para implementar el interferómetro fue tallado a medida por el Dr. Kalal [8] en vidrio de índice de refracción  $n = 1,5$ , con un ángulo de refracción  $\beta = 3^\circ$  (0.052 rad). En la Figura 2 se observa un esquema de la disposición de los principales componentes ópticos.

Se utilizaron las fórmulas e inecuaciones de la referencia [7] para obtener interferogramas de la región bajo observación (pluma) con la magnificación adecuada y con el número de franjas de interferencia óptimo teniendo en cuenta las limitaciones de espacio experimental.

Primero se implementó un interferómetro con el que se obtuvieron interferogramas de 11 franjas. Una franja equivale a dos zonas de interferencia: una constructiva y una destructiva. Luego, con el fin de mejorar la resolución espacial, se diseñó uno de 40 franjas.

En la Figura 3 se presenta un esquema de los equipos utilizados.

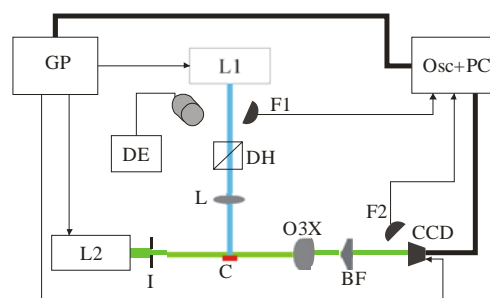


Figura 3. Esquema del Interferómetro de Nomarsky implementado.

L1 Láser de Nd:YAG de 355 nm, 8ns 0,5Hz

L2 Láser de Nd:YAG de 532 nm, 8ns 0,5Hz

GP Generador de Pulsos (Sincronización de L1, L2 y CCD)

Osc+PC Osciloscopio con CPU (Control de GP y CCD)

I Iris

L Lente UV de  $f = 15$  cm

O3X Objetivo 3X,  $f = 10$  cm

BF Biprisma de Fresnel

F1, F2 Fotodiodos

DE Detector de Energía

DH Divisor de Haz

C Combustible

En la Figura 4 se pueden observar interferogramas de 11 y 40 franjas, respectivamente, con: la sombra de un alambre de 170  $\mu\text{m}$  (arriba, a y b) y, el efecto de la pluma de ablación de Al en los patrones de interferencia (abajo, c y d).

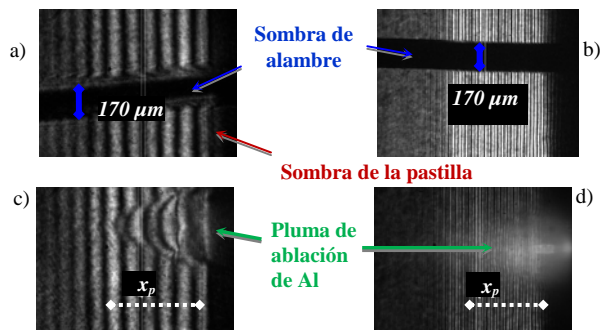


Figura 4. Arriba: Interferogramas de calibración: a) de 11 franjas, b) de 40 franjas. Abajo: Interferogramas de la pluma de Al: c) de 11 franjas y d) de 40 franjas.

$x_p$  es la distancia máxima que alcanzan las partículas de la pluma en el tiempo  $t_r$ .

Con el interferómetro de Nomarsky implementado es posible estudiar la pluma a un tiempo dado,  $t_r$ , determinado por el retardo entre los pulsos del láser de ablación (UV) y del de interferometría (Vis). Este retardo se determinó a partir del registro de ambos pulsos mediante dos fotodiodos. Las plumas de la Figura 3 c) y d), por ejemplo, corresponden a ablación de Al con  $E = 15 \text{ mJ}$  luego de  $t_r = 15 \text{ ns}$  desde el impacto del pulso láser sobre el combustible.

La necesidad de medir los pulsos de ambos láseres directamente con los fotodiodos, se debe a que la pluma se estudia en tiempos del orden del jitter de ambos láseres.

## II.2 Software

Los tiempos de retardo entre los pulsos de ambos láseres se determinaron mediante un programa escrito en MatLab que analiza las señales adquiridas con los fotodiodos y devuelve el  $t_r$ .

Para hallar  $v_e$ , se midió la distancia máxima recorrida por las partículas del combustible eyectadas,  $x_p$ , en  $t_r$  (ver Figura 3):

$$v_e = x_p / t_r \quad (7)$$

Para determinar  $x_p$  se estudiaron conjuntos de interferogramas de 11 y 40 franjas. En un principio, cuando se tenían pocas decenas de interferogramas, se realizó el análisis con ImageJ [9]. Con el *know how* adquirido, para el procesamiento final de serias de varios cientos de interferogramas se escribió un programa en MatLab.

Básicamente, ambos programas, determinan  $x_p$  a partir de la variación, luego de restarle un interferograma de referencia (sin pluma de ablación), del perfil que genera la pluma.

## III. VALIDACIÓN Y RESULTADOS

Para validar este método de determinación se obtuvo  $I_e$  de combustibles conocidos: Al, latón y Delrin a diferentes energías ( $E$ ) y tiempos  $t_r$ . Los valores obtenidos se compararon con los reportados en la literatura [10] hallándose una muy buena concordancia. En la Figura 5 se muestra un gráfico de los valores de  $I_e$  obtenidos en función de la energía del láser de ablación a un tiempo  $t_r$  de 15 ns.

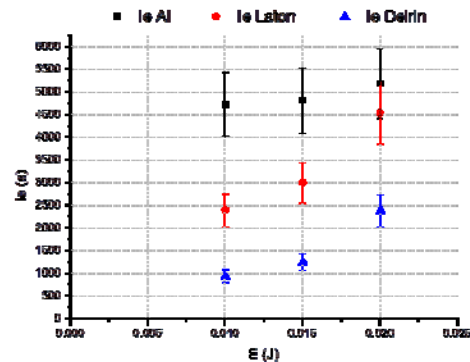


Figura 5.  $I_e$  para combustibles conocidos a diferentes energías del láser UV.

Una vez validado, este método se utilizó para obtener  $I_e$  de los combustibles consistentes en mezclas binarias de Zn/CaCO<sub>3</sub> de diferente composición [1]. En la Figura 6 se muestran los valores de  $C_m$  a  $E = 20 \text{ mJ}$  obtenidos para estos combustibles en un trabajo previo [1] y los de  $I_e$  obtenidos en este trabajo a la misma energía y a  $t_r = 15 \text{ ns}$  en función de la concentración de Zn.

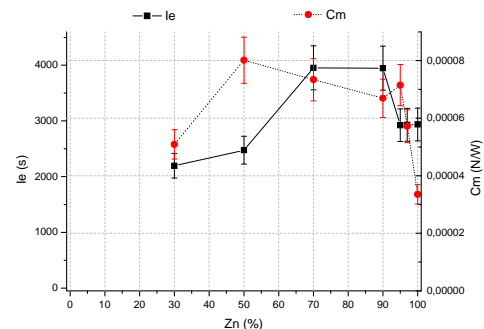


Figura 6.  $C_m$  e  $I_e$  de combustibles compuestos por matriz de Zn dopado con CaCO<sub>3</sub> en diferentes concentraciones a  $E = 20 \text{ mJ}$ .

Finalmente, en la Tabla 1 se indica la eficiencia calculada con la ecuación (6) para cada combustible. Es importante recalcar que, puesto que los combustibles fueron caracterizados en aire, los valores de eficiencia se ven incrementados en un  $\sim 40\%$  debido a la contribución de la disrupción dieléctrica del aire al  $C_m$  [1, 11].

TABLA 1: EFICIENCIA DE COMBUSTIBLES

Zn [%]	Eficiencia
100	48%
97	82%
95	102%
90	129%
70	142%

50	97%
30	55%

#### IV. CONCLUSIONES

El interferómetro de Nomarsky implementado permitió obtener interferogramas no sólo con una imagen óptima de la región bajo observación, sino además con la magnificación requerida.

La variación de la densidad de franjas, 11 a 40, permitió mejorar la resolución espacial de 40  $\mu\text{m}$  a 9  $\mu\text{m}$ . A su vez, esta versatilidad en la elección del número de franjas posibilita la utilización de métodos de análisis más poderosos y el diseño de filtros optimizados en el dominio de la frecuencia.

El sistema de interferometría implementado, sincronizando los láseres de ablación y de diagnóstico con un CCD comercial, posibilitó el estudio de la pluma de ablación con resolución de ns a diferentes instantes desde el impacto del haz de ablación sobre el combustible. En particular, en este trabajo se muestran los resultados de plumas estudiadas a  $t_r = 15$  ns.

Mediante la validación de los  $I_e$  de combustibles conocidos (Al, latón y Delrin) pudo establecerse una metodología para caracterizar la propulsión láser de combustibles en general.

Se midieron, además, los  $I_e$  de combustibles sólidos binarios desarrollados por nuestro grupo y pudo determinarse la eficiencia de los mismos.

La mayor contribución al error en la determinación de  $x_p$  es la pérdida de contraste debido al *blurring* (foto con movimiento). Este es ocasionado por la superposición de varias franjas instantáneas durante los 8 ns de duración del pulso de diagnóstico del plasma bajo observación en el único interferograma que captura el CCD. Este efecto podría evitarse realizando las mediciones con un láser de diagnóstico con pulsos

mucho más cortos (femtosegundos) o bien, en vacío, a un  $t_r$  para el cual los eventos sean más lentos que el tiempo de diagnóstico.

#### IV. REFERENCIAS

- 1 - C. A. Rinaldi et al., "Propulsion: Types, Technology and Applications", Ch 11. ISBN: 978-1-61470-606-9.
- 2 - C. Phipps, "Micro Laser Plasma Thrusters for Small Satellites", Photonic Associates F49620-98-C-0038 Phase I Final Report Page 1 of 54 Version 7/2/99.
- 3 - C. Phipps et al, "Laser ablation of organic coatings as a basis for micropropulsion", Thin Solid Films 453 –454 (2004) 573–583.
- 4 - Gary S. Settles et al, "A review of recent developments in schlieren and shadowgraph techniques", DOI: 10.1088/1361-6501/aa5748.
- 5 - M. Kalal et al, "Phase-amplitude imaging: its application to fully automated analysis of magnetic field measurements in laser-produced plasmas", Applied Optics Vol. 26, No. 9, (1987) 1674-1679.
- 6 - Juan Lorenzi, Carlos Rinaldi, Cinthya Toro Salazar; Mayo Villagran Muñiz; Salvador Ortiz, "Thermodynamic Characterization of Supersonic Expansions Using Shadowgraphy and Numerical Simulations", 43rd AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, San Diego – USA, 24 – 27 Junio de 2013.
- 7 - M. Kalal et al, "Compact Design of a Nomarski Interferometer and Its Application in the Diagnostics of Coulomb Explosions of Deuterium Clusters", Journal of the Korean Physical Society, Vol. 56, No. 1, (2010) 287-294 .
- 8 - Dr. M. Kalal, Department of Physical Electronics, Faculty of Nuclear Sciences and Physical Engineering, Czech Technical University de Praga, República Checa.
- 9 - <https://imagej.nih.gov/ij/docs/menus/analyze.html#plot>
- 10 - C. Phipps et al, "LISP: Laser impulse space propulsion", Laser and Particle Beams, Vol. 12, No 1, (1994), 23-54.
- 11 - C. Phipps et al., Journal of Propulsion and Power 26, (2010), 609-637.