

**CARACTERIZACION ESPACIAL Y CALIDAD DE HACES LUMINOSOS
A TRAVES DE SISTEMAS OPTICOS GENERALES**

**SPATIAL CHARACTERIZATION AND QUALITY OF LIGHT BEAMS
PROPAGATING THROUGH GENERAL OPTICAL SYSTEMS**

P. M. Mejías, R. Martínez-Herrero, J. Serna, G. Piquero y M. Sánchez*

Departamento de Optica,
Facultad de Ciencias Físicas,
Universidad Complutense, 28040-Madrid, España

*DENA LASER

Resumen

En este trabajo se exponen de forma resumida las actividades llevadas a cabo por los autores en el campo de la caracterización espacial paramétrica de haces luminosos y su propagación a través de sistemas ópticos generales. Se da además un ejemplo experimental de medida que muestra la influencia que ejerce sobre el parámetro de calidad de un haz la aberración esférica de una lente.

Abstract

In this work the researches developed by the authors concerning the spatial parametric characterization of light beams and their propagation through general optical systems are summarized. As an illustrative experimental example of measuring, the influence of the spherical aberration of a lens on the quality parameter of a beam is presented.

1. INTRODUCCION

La caracterización espacial de haces de luz arbitrarios y el establecimiento de criterios apropiados de calidad constituyen en la actualidad un campo de intenso desarrollo y actividad. Como es bien conocido, el empleo de láseres en el procesado industrial de materiales precisa altas potencias (en

buena parte conseguidas), pero requiere asimismo y cada vez en mayor medida una estructura espacial adecuada del haz (relacionada con sus posibilidades de enfoque). En otras aplicaciones (por ejemplo, anemometría laser, comunicaciones ópticas, etc.) el astigmatismo que presenta la distribución de intensidad a la salida de un laser de semiconductores debe ser eficientemente corregido. Y, en general, es evidente la necesidad de conocer cómo dicha estructura espacial se modifica al propagarse o se optimiza mediante aberturas y transmitancias apodizantes. Estas consideraciones, entre otras, plantean la necesidad de encontrar una caracterización de los haces laser que

- i) sea válida para haces arbitrarios (parcialmente coherentes).
- ii) pueda determinarse mediante cálculo analítico y/o numérico.
- iii) sea medible directamente.
- iv) preferiblemente, permita la aplicación del formalismo matricial ABCD en sistemas no-difraccionales, lo que posibilitaría encontrar leyes de propagación simples.

Naturalmente, a partir de un conocimiento espacial detallado de la amplitud del haz en cualquier plano tendríamos una información completa acerca de su comportamiento. Sin embargo, desde un punto de vista práctico, y aún dejando de lado la complejidad inherente en la medida y en el posterior procesado de datos, tal conocimiento puntual y exhaustivo no sería necesario en la mayoría de los casos.

En realidad, resulta más aconsejable tratar de caracterizar el haz, en lugar de por su perfil punto a punto, mediante ciertos parámetros globalizadores cuya variación al atravesar un sistema óptico pueda ser calculada y, por consiguiente, prevista de forma simple. Resultaría de gran ayuda, por tanto, definir figuras de mérito adecuadas que pudieran servir para comparar espacialmente entre sí la emisión de diferentes láseres. En este sentido, el establecimiento de una normativa ISO aceptada como patrón por todos los países es otro de los aspectos más debatidos en la comunidad científica internacional /1/.

Y, desde una vertiente comercial, los primeros dispositivos de medida, aunque todavía han de ser objeto de mejoras, han comenzado a salir al mercado (pueden citarse, por ejemplo, los de las firmas Spiricon, Coherent, Big Sky Corp. y Photon Inc., entre otras), y en un futuro no muy lejano es de esperar un mayor desarrollo de los mismos.

Con esta triple perspectiva, en lo que sigue se muestran de forma esquemática las principales actividades llevadas a cabo dentro de esta línea de investigación, iniciada en 1989 (en lo que se refiere al Departamento de Óptica de la Universidad Complutense de Madrid) por los autores del presente trabajo.

2. FORMALISMO Y PARAMETROS ESPACIALES CARACTERISTICOS

Con el fin de lograr mayor generalidad (especialmente cuando se manejan haces parcialmente coherentes, como ocurre, por ejemplo, con láseres multimodo), nuestro formalismo se ha basado en la denominada función de distribución de Wigner del haz, h , la cual, como es bien conocido /2-4/, viene determinada a partir de su densidad espectral mutua, G , mediante la expresión

$$h(\mathbf{B}, \boldsymbol{\mu}, z) \propto \int_{-\infty}^{+\infty} d^2s G(\mathbf{B}+s/2, \mathbf{B}-s/2, z) \exp(-ik\boldsymbol{\mu}s), \quad (1)$$

donde \propto indica proporcionalidad, $\mathbf{B}=(x,y)$ es el vector bidimensional transversal al eje z (que señala la dirección de propagación) y $k\boldsymbol{\mu}=(k_u, k_v)=(k_x, k_y)$ proporciona las componentes del vector de onda según los ejes x e y . Por consiguiente, u y v representan ángulos de propagación (sin tener en cuenta las ondas evanescentes). La función de Wigner ha sido empleada anteriormente en Física Cuántica /5/ proporcionando una descripción de los fenómenos mecánicos en el espacio de fases, y, más recientemente /6,7/, ha sido introducida en el dominio de la Óptica. En este campo, puede interpretarse, en principio, como la distribución local de energía asociada a cada frecuencia espacial ω , si se prefiere, como la radiación que atraviesa un cierto punto en una determinada dirección. Por ello ha sido considerada por algunos autores como una radiancia generalizada, si bien esta concepción presenta cierta inconsistencia debido a que h puede tomar valores negativos en algunas circunstancias /8,9/. Sin embargo, no por ello deja de ser útil, ya que su integración nos puede proporcionar resultados medibles. Así

$$\int h \, du \, dv$$

es la intensidad del haz, y

$$\int h \, dx \, dy$$

es una cantidad proporcional a su intensidad radiante. Es más, con carácter general podemos utilizarla para definir el promedio de una magnitud genérica q :

$$\langle q \rangle = \int q \, h \, dx \, dy \, du \, dv, \quad (2)$$

donde q puede designar variables puramente espaciales (tales como x , x^2 , x^2+y^2 , etc), puramente angulares (u , u^2 , u^2+v^2 , etc), o productos cruzados (xu , xv , x^2u^2 , etc). De hecho, es bien conocido /4, 10-22/ que los tamaños del haz en campo próximo y en campo lejano (divergencia angular) vienen

dados por los promedios (también llamados por algunos autores “momentos”) de x^2+y^2 y de u^2+v^2 , respectivamente.

Nuestra caracterización espacial paramétrica de los haces luminosos se apoya, precisamente, en esta clase de promedios (dados por la Ec.(2)), y así hemos definido y manejado (además de los dos ya mencionados) los siguientes parámetros caracterizadores:

- Grado de astigmatismo
- Ejes absolutos
- Ejes de referencia
- Calidad de haz.

Quizás sea este último, estrechamente relacionado con el parámetro de Siegman M^2 /13,21/, definido en la forma

$$Q = \langle x^2+y^2 \rangle \langle u^2+v^2 \rangle - \langle xu+yv \rangle^2, \quad (3)$$

el que haya tenido hasta ahora mayor interés práctico. La idea de caracterizar mediante un único parámetro global la calidad de un haz láser no es nueva. Es más, han estado utilizándose diferentes criterios de índole experimental /22/. Sin embargo, todos ellos adolecen de serias inconsistencias teóricas y problemas de aplicabilidad general. El criterio basado en el parámetro Q dado en (3) ofrece, por el contrario, interesantes ventajas y cumple los requisitos i)-iv) enunciados en la Introducción. Por ello ha sido adoptado por diversas empresas que diseñan y comercializan dispositivos de análisis de haz.

Por otra parte, aunque las más extendidas tendencias de parametrización manejan parámetros de primer y segundo orden (relacionados con momentos de primer y segundo orden de la intensidad y de la intensidad radiante del haz, como son los hasta ahora mencionados), la estructura espacial asimétrica y astigmática que presentan buen número de haces láser (por ejemplo, los emitidos por amplificadores de flujo transversal rápido o por diodos láser) hacen, sin embargo, aconsejable la consideración en estos casos de parámetros de orden superior (de tercer y cuarto orden). Así, se han manejado dos nuevos parámetros:

- Coeficiente de simetría (grado de simetría del haz)
- Curtosis (grado de “aplanamiento del haz”),

si bien la lista no debe considerarse concluida.

3. ACTIVIDADES DESARROLLADAS

Mediante el empleo de los parámetros anteriores, las actividades desarrolladas en esta línea de investigación pueden esquematizarse como sigue /23-38/:

Aspectos desarrollados

- * Definición de parámetros caracterizadores.
- * Determinación de parámetros invariantes.
- * Obtención de leyes de propagación de los parámetros característicos a través de sistemas ópticos generales.
- * Relación coherencia-calidad.
- * Optimización de la calidad.

Tipos de haces considerados

- * Haces espacialmente coherentes.
- * Modos laser de Hermite-Gauss.
- * Haces Gauss-Schell.
- * Haces emitidos por diodo-laser.
- * Haces generales parcialmente coherentes.

Tipos de medios y sistemas analizados

- * Sistemas ABCD.
- * Medios activos no-lineales.
- * Transmitancias de fase.
- * Aberturas de borde blando gaussianas y supergaussianas.
- * Lentes esféricas (aberraciones).
- * Axicones.

Naturalmente, la relación anterior no agota los dominios de aplicación en los que se requiere una correcta parametrización espacial de los haces laser. Por ello, queremos mencionar otros problemas abiertos, actualmente en estudio, algunos de ellos de tipo fundamental.

- * Unificación de definiciones:

El formalismo que se ha presentado aquí es, como mencionamos antes, uno de los posibles. Es necesario, por tanto, establecer claramente la equivalencia y equiparación con otros existentes. En

buena parte este trabajo ya ha sido realizado /36/.

* Momentos laterales:

Habitualmente, los perfiles laser muestran una forma acampanada, con un máximo de intensidad en su centro. Lo mismo ocurre en campo lejano. Sin embargo, para otros tipos de haces (por ejemplo, los emitidos por resonadores inestables, o por ciertos láseres de estado sólido de núcleo anular) la sección transversal del haz tiene forma de donut, con menor intensidad en el centro que en los bordes. La caracterización espacial y el comportamiento de esta clase de haces requiere una parametrización especial, que puede llevarse a cabo mediante la introducción de los denominados momentos laterales del haz. Los primeros resultados en esta dirección aparecerán próximamente /35/.

* Difracción por aberturas de borde duro.

* Haces polarizados.

* Pulsos de luz.

Como es fácil de imaginar, estos tres últimos aspectos poseen un marcado carácter fundamental puesto que extienden la parametrización a cualquier situación física de interés.

4. MEDIDA DE LOS PARAMETROS: EJEMPLO EXPERIMENTAL

A título de ejemplo ilustrativo del dispositivo usual de medida de los parámetros espaciales de un haz mostraremos en esta sección el empleo para observar y comprobar experimentalmente la influencia que ejerce la aberración esférica de una lente sobre el parámetro de calidad de un haz laser.

El dispositivo experimental está esquematizado en la Fig.1: El tamaño del haz laser se obtuvo procesando la información recibida de una matriz CCD de fotodetectores. Como fuente de luz se empleó un laser de He-Ne estabilizado en frecuencia e intensidad. Para evitar la saturación de la cámara CCD se atenuó el haz mediante dos prismas y un filtro neutro de densidad.

Analíticamente se ha demostrado /31,39/ que

$$Q_{ab} = Q_i \{1 + 6[16\pi Cw^4/\lambda]^2\}^{1/2}, \quad (4)$$

donde C es una constante (en nuestro caso vale $4.63 \times 10^{-6} \text{ mm}^{-3}$) que sólo depende del radio de curvatura de la lente, w el tamaño del haz laser (proporcional a $\langle x^2 \rangle$) sobre el plano de la lente aberrada L_2 , y Q_i y Q_{ab} designan, respectivamente, el parámetro de calidad del haz antes y después de atravesar L_2 . La validez de la Ec.(4) se ha demostrado modificando w de forma controlada (desplazando la lente auxiliar L_1) y determinando en cada caso Q_{ab} y Q_i (este último, como era de

esperar, permanece prácticamente constante). El buen ajuste de los datos experimentales (círculos) con la curva teórica dada por la Ec.(4) se observa inmediatamente a la vista de la Fig.2.

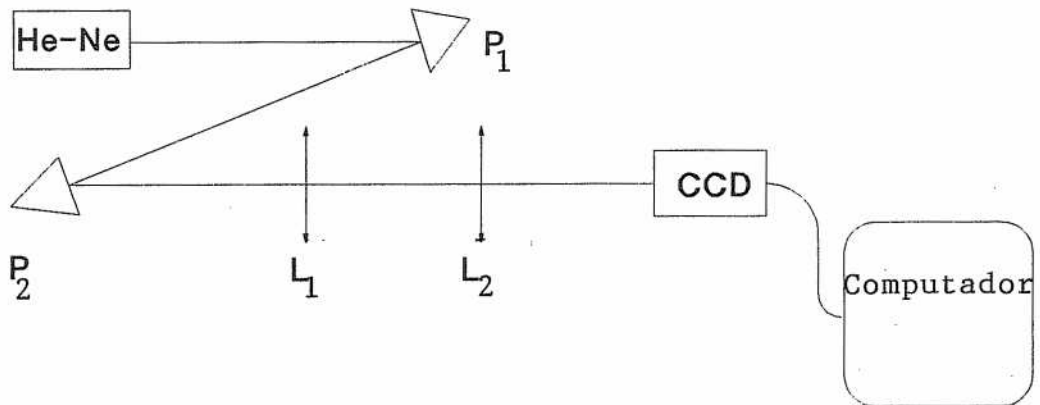


Figura 1

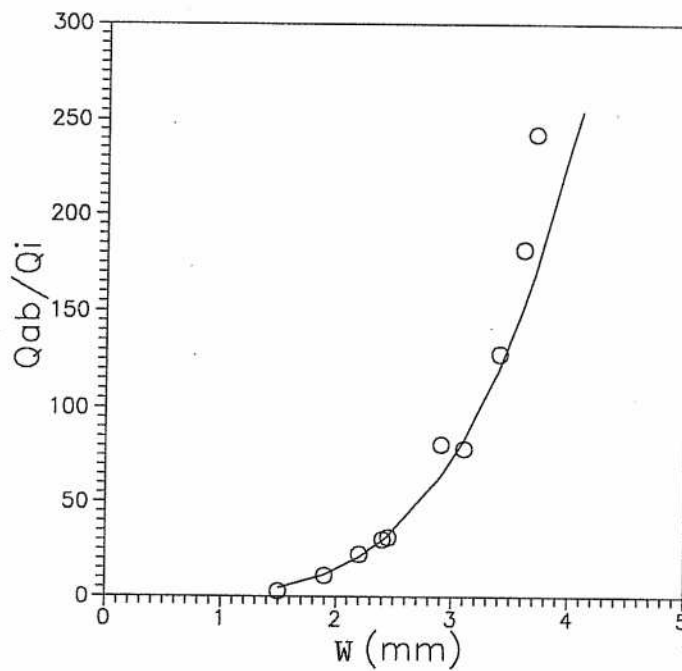


Figura 2

AGRADECIMIENTOS

Las actividades de investigación que han sido mencionadas en el presente trabajo han estado financiadas por la Empresa Nacional de Optica (ENOSA) y por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología de España, bajo el Proyecto ROB90-539. Queremos dar las gracias asimismo a los Profesores A. E. Siegman, de la Universidad de Stanford, H. Weber, del Festkörper-Laser-Institut de Berlin y G. Nemes, del Instituto de Física Atómica de Bucarest, por sus valiosas sugerencias y comentarios.

BIBLIOGRAFIA

1. International Organization for Standardization. ISO/TC 172/SC 9/WG1: Terminology and test methods for lasers.
2. M. J. BASTIAANS, *Opt. Commun.*, **25**, 26 (1978).
3. M. J. BASTIAANS, *J. Opt. Soc. Am.*, **69**, 1710 (1979).
4. M. J. BASTIAANS, *J. Opt. Soc. Am. A*, **3**, 1227 (1986).
5. E. WIGNER, *Phys. Rev.*, **40**, 749 (1932).
6. A. WALTHER, *J. Opt. Soc. Am.*, **58**, 1256 (1968).
7. A. WALTHER, *J. Opt. Soc. Am.*, **63**, 1622 (1973).
8. E. W. MARCHAND y E. WOLF, *J. Opt. Soc. Am.*, **62**, 1972 (1972).
9. E. W. MARCHAND y E. WOLF, *J. Opt. Soc. Am.*, **64**, 1219 (1974).
10. S. LAVI, R. PROCHASKA y E. KEREN, *Appl. Opt.*, **27**, 3696 (1988).
11. R. SIMON, N. MUKUNDA y E. C. G. SUDARSHAN, *Opt. Commun.*, **65**, 322 (1988).
12. M. J. BASTIAANS, *Optik*, **82**, 173 (1989).
13. A. E. SIEGMAN, *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.*, **1224**, 1 (1990).
14. P. A. BELANGER, *Opt. Lett.*, **16**, 196 (1991).
15. P. A. BELANGER y C. PARE, *Opt. Lett.*, **16**, 1057 (1991).
16. M. J. BASTIAANS, *Optik*, **88**, 163 (1991).
17. H. WEBER, "Propagation of higher-order intensity moments in quadratic index media", Internal Report, Festkörper-Laser-Institut Berlin (1991).
18. N. HODGSON, T. HAASE, R. KOSTKA y H. WEBER, *Opt. Quantum Electron.*, **24**, 927 (1992).
19. N. HODGSON y T. HAASE, *Opt. Quantum Electron.*, **24**, 903 (1992).
20. N. RENG y B. EPPICH, *Opt. Quantum Electron.*, **24**, 973 (1992).
21. A. CAPRARA y G. C. REALI, *Opt. Lett.*, **17**, 414 (1992).
22. J. L. H. NEIRA, J. DELGADO, G. CALVO y M. SANCHEZ, *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.*, **1132**, 1 (1989).

23. J. SERNA, R. MARTINEZ-HERRERO y P. M. MEJIAS, *J. Opt. Soc. Am. A*, **8**, 1094 (1991).
24. R. MARTINEZ-HERRERO y P. M. MEJIAS, *Opt. Commun.*, **85**, 162 (1991).
25. J. SERNA, P. M. MEJIAS y R. MARTINEZ-HERRERO, *J. Modern Opt.*, **39**, 625 (1991).
26. J. SERNA, P. M. MEJIAS y R. MARTINEZ-HERRERO, *Appl. Opt.*, **31**, 4430 (1992).
27. J. SERNA, P. M. MEJIAS y R. MARTINEZ-HERRERO, *Opt. Quantum Electron.*, **24**, 873 (1992).
28. J. SERNA, P. M. MEJIAS y R. MARTINEZ-HERRERO, *Opt. Quantum Electron.*, **24**, 881 (1992).
29. R. MARTINEZ-HERRERO, P. M. MEJIAS, M. SANCHEZ y J. L. H. NEIRA, *Opt. Quantum Electron.*, **24**, 1021 (1992).
30. R. MARTINEZ-HERRERO y P. M. MEJIAS, "Expansion of the cross-spectral density function of general fields and its application to beam characterization", *Opt. Commun.* (1992), en prensa.
31. R. MARTINEZ-HERRERO, P. M. MEJIAS y G. PIQUERO, "Quality improvement of partially coherent symmetric-intensity beams caused by quadratic phase distortions", *Opt. Lett.* (1992), en prensa.
32. R. MARTINEZ-HERRERO y P. M. MEJIAS, "Quality improvement of symmetric-intensity beams propagating through pure-phase plates", *Opt. Commun.* (1992), en prensa.
33. J. SERNA, P. M. MEJIAS y R. MARTINEZ-HERRERO, "Beam quality changes in Hermite-Gauss mode fields propagating through Gaussian apertures", *Appl. Opt.*, en prensa.
34. J. SERNA, P. M. MEJIAS y R. MARTINEZ-HERRERO, "Quality changes of beams propagating through super-Gaussian apertures", *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.*, **1834**, en prensa.
35. R. MARTINEZ-HERRERO y P. M. MEJIAS, "Parametric characterization of depleted-centre intensity beams", *Proc. Photo-Opt. Instrum. Eng.*, **1834**, en prensa.
36. R. MARTINEZ-HERRERO, P. M. MEJIAS y H. WEBER, "On the different definitions of laser beam moments", enviado para publicación.
37. J. SERNA y G. NEMES, "Decoupling of Gaussian beams with general astigmatism", enviado para publicación.
38. G. PIQUERO, P. M. MEJIAS y R. MARTINEZ-HERRERO, "Quality changes of Gaussian beams propagating through axicons", enviado para publicación.
39. A. E. SIEGMAN, "Analysis of laser beam quality degradation caused by quartic spherical aberration", *Appl. Opt.*, en prensa.

★ ★ ★