

Ingeniería de haces láser: Propiedades, manipulación y aplicaciones

Gustavo Rodríguez Morales, Fausto Sánchez Cruz,
Simón Martínez Martínez
FIME-UANL

grodriguez@gama.fime.uanl.mx, fasanchez@gama.fime.uanl.mx,
simartin@gama.fime.uanl.mx

RESUMEN

Desde la invención del sistema láser hasta hoy en día el desarrollo tecnológico se ha visto favorecido con esta fuente de luz. Una disciplina en esta área es la confección de haces o la de producir haces con perfiles de intensidad especializados, herramienta que manipula micro-partículas solo con luz. En este artículo se presenta una revisión de los haces láser y las formas de modificar un haz Gaussiano en uno especializado para que tenga propiedades de intensidad y fase con las cuales se puede transferir energía a los materiales para su manipulación mecánica a escala micrométrica.

PALABRAS CLAVE

Láser, confección de haces, manipulación óptica.

ABSTRACT

The invention of the laser system has favored technological development. A discipline in this area is the beam tailoring or the production of beam with specialized intensity profiles. A review of the specialized laser light beams are presented in this work, as well as the ways to modify a Gaussian beam to a specialized one to add intensity and phase properties with which we can transfer energy to materials for their mechanical manipulations at a micrometric scale.

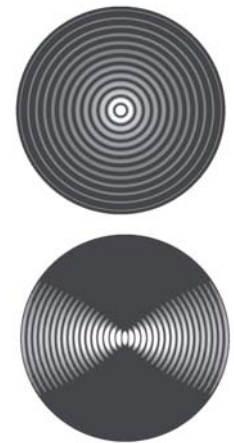
KEYWORDS

Laser, beam tailoring, optical manipulation.

INTRODUCCIÓN

La luz es parte vital de la existencia de la vida, durante siglos la luz solar ha sido aprovechada de forma natural por los seres humanos en el planeta. Desde las primeras investigaciones sobre el comportamiento de la luz, no se tenían avances significativos para aplicaciones tecnológicas comparado con los avances logrados a partir de la invención del láser en los años 60's. Con el láser surge una gama de aplicaciones de índole científica y por supuesto se da un desarrollo tecnológico de tal magnitud que hoy en día es común el uso de luz láser en cualquier laboratorio científico o tecnológico, así como en los hogares.

Más allá del uso del láser como una fuente que entrega luz con un perfil de intensidad Gaussiano con su fase característica, se pueden agregar características adicionales a las del láser común.¹⁻⁴ Esto es, se puede modificar (entre otras



características) la fase y el perfil de intensidad, parámetros suficientes para agregar una amplia gama de aplicaciones a las ondas electromagnéticas. Aplicaciones de dimensiones espaciales pequeñas pero de amplio aprovechamiento, refiriéndonos a la manipulación mecánica de partículas de escala micrométrica, esto debido a que durante la interacción de la luz con los objetos sucede una transferencia de energía que permite mover partículas, moléculas, átomos, bacterias u objetos a esta escala.

HACES DE LUZ

Aún cuando no existe una definición formal de haz de luz es común tomar como válida la analogía con un rayo de carácter unidimensional, en la dirección de propagación de la luz. Un haz es más complicado, este sería un conjunto de rayos los cuales no necesariamente tendrán la misma dirección o sus direcciones varían ligeramente con respecto a un eje de propagación. La idea del conjunto de rayos sirve para describir la propiedad de dimensión transversal que poseen los haces de luz. Otra característica que es imposible describir con los rayos es la fase de las ondas que componen el haz. El tratamiento que permite describir de forma completa las características de un haz es el ondulatorio. Donde el haz se considera una onda que tiene una dirección preferencial de propagación. El caso más conocido de tratamiento de haces son los Gaussianos, descritos con las características de divergencia o convergencia, la fase del frente de onda y la dimensión transversal del haz.¹⁻⁴ Es común encontrar este tipo de haces en los sistemas láser y muchos de los haces con una estructura más compleja hacen uso de los haces Gaussianos.

HACES GAUSSIANOS

En general cualquier descripción matemática de un haz es solución a las ecuaciones de Maxwell y si se considera la naturaleza oscilatoria armónica de las ondas electromagnéticas esta descripción matemática es la solución a la ecuación de Helmholtz, dada por

$$\nabla^2 \psi + k^2 \psi = 0 \quad (1)$$

donde ψ es la solución de la ecuación, k es el número de onda ($k = 2\pi/\lambda$), y ∇^2 es el laplaciano ($\nabla^2 = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2 + \partial^2/\partial z^2$).

Considerando que el haz es una onda cuya propagación es altamente direccional, se hace uso de la aproximación paraxial en la que se considera que las variaciones del campo electromagnético en la dirección transversal son muy pequeñas comparadas con la dirección de propagación. Al aplicar esta aproximación la ecuación (1) se reduce a la ecuación paraxial, dada por

$$\nabla_t^2 \psi - i2k \frac{\partial \psi}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

donde $\nabla_t^2 \equiv \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$ es el Laplaciano transversal. La solución común de esta ecuación son los llamados haces Gaussianos, dados por

$$\begin{aligned} \psi(x, y, z) = & \frac{w_0}{w(z)} \exp\left[-r^2/w^2(z)\right] \\ & \times \exp\left[-ikz + i \tan^{-1}\left(\frac{z}{z_0}\right)\right] \\ & \times \exp\left[-i kr^2/2R(z)\right]. \end{aligned} \quad (3)$$

Cada factor en la ecuación (3) corresponde a una propiedad física del haz. El primer factor es la amplitud del campo electromagnético. El segundo es la fase longitudinal (en la dirección de propagación) y el tercero es la fase radial (en el plano transversal). Los parámetros que describen un haz Gaussiano, y que dependen de la propagación, son, el diámetro del haz (tamaño del punto) dado por

$$w^2(z) = w_0^2 \left[1 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2 \right] \quad (4)$$

el radio de curvatura del frente de onda, dado por

$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{z_0}{z}\right)^2 \right] \quad (5)$$

y las constantes con la propagación

$$z_0 = \frac{kw_0^2}{4} \quad (6)$$

w_0 es llamado la cintura del haz, medida que es el diámetro del haz en el punto donde este diámetro es el mínimo posible, y z_0 se conoce como la distancia de Rayleigh que físicamente es la distancia de propagación durante la cual el haz no cambia su diámetro significativamente, y es medida desde la cintura del haz. La figura 1 muestra el comportamiento de los parámetros que componen

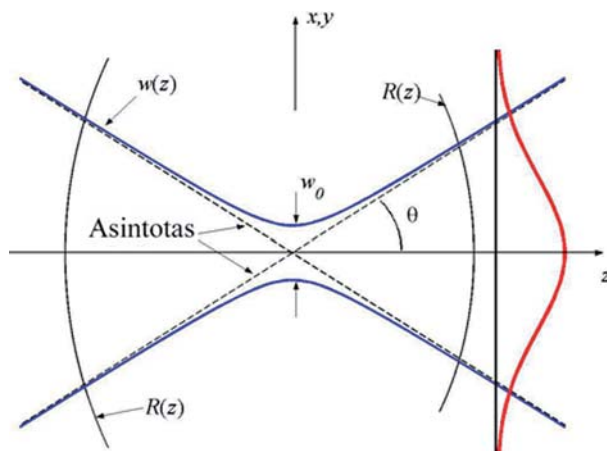


Fig. 1. Comportamiento del diámetro del haz Gaussiano, de los frentes de onda y del perfil de intensidad.

el haz Gaussiano. Como se observa el diámetro del haz tiene un comportamiento hiperbólico, donde los vértices de las hipérbolas representan la cintura del haz w_0 .

Los frentes de onda son curvas parabólicas cuyo radio de curvatura en la región paraxial (alrededor del eje de propagación) se describe por un semicírculo cuyo radio está dado por $R(z)$. El factor de amplitud en la ecuación (3) tiene un perfil Gaussiano y el ancho de este es $w(z)$ el cual representa la naturaleza difractiva de la luz, y por otro lado el perfil Gaussiano está atenuado por $w_0/w(z)$ el cual hace que disminuya la amplitud del haz conforme se propaga alejándose de la cintura del haz.

Este factor físicamente se encarga de cumplir la conservación de la energía del haz, pues conforme se propaga éste se vuelve más ancho y su amplitud disminuye, distribuyendo la energía en un área más grande conforme se aleja de la cintura del haz.

La figura 2, que muestra la propagación de un haz Gaussiano, se compone de dos partes, la superior indica la amplitud del campo electromagnético que es descrito por el primer factor de la ecuación (3), la parte inferior de la figura representa la fase del haz Gaussiano descrito por el segundo y tercer factor de la ecuación (3). El segundo factor describe la fase a lo largo del eje de propagación, el tercero por su parte describe la fase en la dirección radial, dando lugar a las curvas de igual fase que muestra la parte inferior de la figura 2.

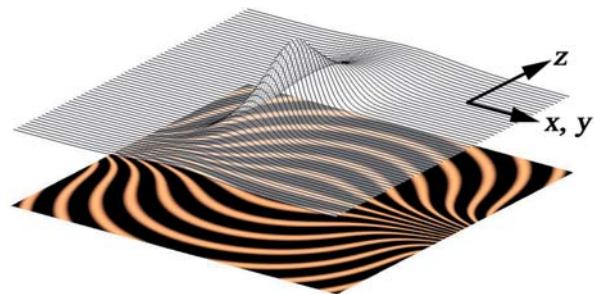


Fig. 2. Propagación de un haz Gaussiano, mostrando la intensidad y la fase del haz.

AMPLIFICACIÓN DE LUZ POR EMISIÓN ESTIMULADA DE RADIACIÓN (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

Aunque la explicación detallada de los procesos moleculares que ocurren en los láser es un tanto compleja,^{1,5} éste es un dispositivo bastante sencillo si se estudia de forma “macroscópica”. Esta escala depende del tipo de láser, los diodos láser tienen dimensiones del orden de micras y realizan la misma función que uno que tiene dimensiones de metros.

La configuración básica de un sistema láser consta de dos espejos paralelos, entre estos se tiene un medio activo el cual, con un suministro de energía externa transforma la energía suministrada a energía electromagnética, comúnmente se dice que actúa como amplificador de luz. La figura 3 muestra el esquema básico de un láser cuyo funcionamiento consiste en que los átomos o moléculas en el medio activo son excitados por la energía externa.

En general esta energía de exceso en el medio activo se libera en un tiempo regularmente muy corto, la forma de liberar dicha energía puede ser por diferentes mecanismos, entre estos están las vibraciones mecánicas (calor) y por emisión de luz, algunos otros mecanismos se presentan dependiendo

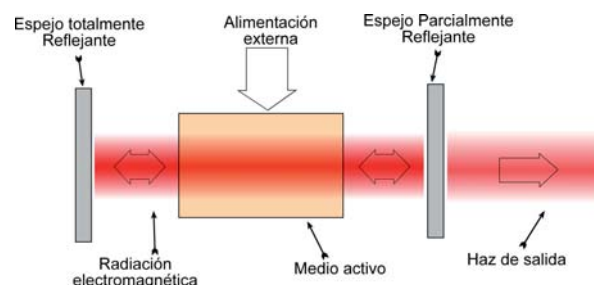


Fig. 3. Esquema de un sistema láser.

del estado (sólido, líquido o gas) del medio activo, en este caso sólo la emisión de radiación. Para entender mejor la acción láser es conveniente hablar en términos de partículas de luz, conocidas como fotones.¹ Los fotones son emitidos en todas direcciones, es decir como una fuente de iluminación térmica (un foco incandescente). Los dos espejos forman lo que se conoce como cavidad óptica cuya función es contener los fotones entre los espejos y hacerlos viajar a través del medio activo en múltiples ocasiones.

En el caso de espejos planos, los fotones seleccionados son aquellos que viajan en dirección paralela a la superficie de los espejos, lo cual sólo sucede si los espejos están alineados y sus superficies reflejantes están completamente paralelas. En caso de tener alguna desalineación la mayoría de la luz se perderá en las zonas abiertas de la cavidad. Hasta este punto la selectividad en la dirección de propagación le da a la luz láser la propiedad de ser unidireccional, lo más parecido a un rayo de luz.

Por otro lado la separación entre los espejos también es un parámetro de gran importancia para el funcionamiento del sistema, ya que esta distancia define la frecuencia (color) de la luz que podrá confinar la cavidad y por lo tanto será el color de la luz que emita el láser. Este parámetro se vuelve crítico debido a que el medio activo comúnmente no emite radiación en todo el continuo de frecuencias, sino sólo discretamente en las frecuencias de resonancia, teniendo cada material diferentes frecuencias de resonancia. De aquí que la cavidad óptica (también llamado resonador óptico) se tiene que sintonizar a la frecuencia de resonancia del medio activo, esta sintonización se da cuando la distancia entre los espejos es un múltiplo de la mitad de la longitud de onda de la luz ($\lambda = \frac{v}{f}$, λ : longitud de onda, v : frecuencia y c : velocidad de la luz).

Al tener los espejos paralelos y la cavidad en sintonía con alguna frecuencia de resonancia del medio activo, se logra la emisión láser. La figura 4 muestra los tres procesos fundamentales en la interacción de la radiación con un átomo. En la absorción de un fotón el átomo pasa a un estado excitado (con exceso de energía), para después de un tiempo, y sin ninguna provocación externa, sufrir una emisión espontánea, emitiendo la energía de exceso en forma de fotón en alguna dirección.

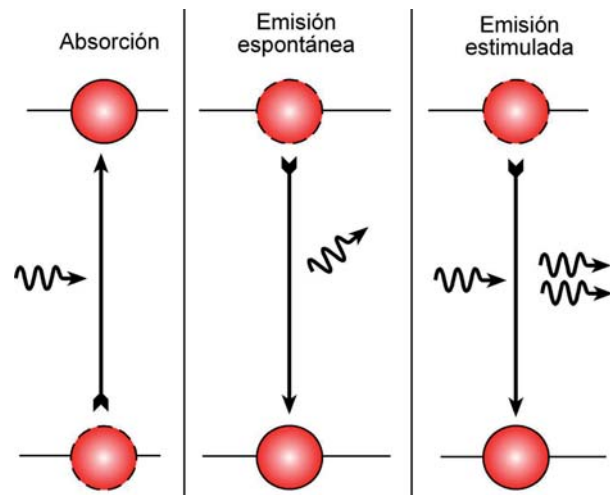


Fig. 4. Transiciones energéticas radiactivas en un átomo.

Por otra parte, si antes de que el átomo emita la energía por sí solo se le perturba con otro fotón, el átomo emitirá un fotón con las mismas características del fotón incidente, es decir copia la dirección y fase de oscilación. En este caso, como inicialmente el átomo estaba excitado el fotón incidente no se absorbe, de tal forma que tendremos dos fotones idénticos al final de la transición, lo cual se interpreta como una amplificación de luz. Estos fotones, incidente y clonado, continuarán viajando perturbando a otros átomos excitados provocando una cascada de fotones hasta lograr una densidad de fotones muy alta de tal forma que los pocos que pueden escapar por el espejo semireflejante logran construir el haz de luz que se observa al accionar un sistema láser.

Una de las características especiales de las fuentes láser es la llamada coherencia de la luz, esto es, los fotones que salen en el haz láser están todos en fase dando lugar a la formación de los llamados frentes de onda, que son superficies perpendiculares a la dirección de propagación de las ondas, en las cuales las ondas tienen la misma fase, también llamadas superficies equifase. La coherencia es el orden que tienen los fotones para formar una superficie con igual fase conforme se propagan. Las características del frente de onda sirven para clasificar los tipos de ondas, las más comunes en experimentos ideales son las ondas planas y las ondas esféricas, donde el frente de onda es un plano y una esfera respectivamente.

HACES ESPECIALIZADOS

Se pueden generar toda una gama de haces láser donde las diferencias entre ellos son los frentes de onda y los perfiles de intensidad, los cuales regirán el comportamiento del haz conforme se propaga.

Haces esferoidales

Un tratamiento de haces más generalizado consiste en usar modelos matemáticos más completos, como son las soluciones a la ecuación de Helmholtz en sistemas coordenados más generales. De acuerdo a las características de cada sistema coordinado los haces que se describen poseerán diferentes características de propagación. Un primer caso es el de las soluciones en coordenadas esferoidales⁶ donde el comportamiento de las superficies ortogonales que conforman este sistema coordinado de forma natural proporciona las características del haz Gaussiano.

La figura 5 muestra las superficies que conforman el sistema coordinado esferoidal oblato, las cuales son: un elipsoide, un hiperboloide de una hoja y un plano, en este caso, el hiperboloide describe el diámetro del haz conforme se propaga, este equivale a la descripción de la ecuación (4). El elipsoide describe los frentes de onda, que en este caso son frentes de onda elípticos en lugar de parabólicos que resultan de la aproximación paraxial.

En el caso de la solución en coordenadas esferoidales no es necesario hacer uso de dicha aproximación, ésta es una solución exacta con la

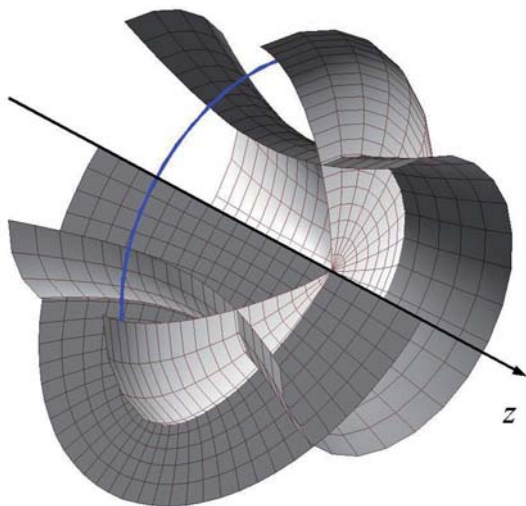


Fig. 5. Superficies que conforman el sistema coordinado esferoidal oblato.

que se describen tanto los haces paraxiales como los no-paraxiales, los cuales tienen la característica de que conforme se propagan se alejan del eje de propagación rápidamente, tal como la luz emitida por un láser de diodo o a la salida de una fibra óptica. Otra forma de imaginarse los haces no paraxiales, es cuando con ayuda de una lente, se enfoca la luz formando un punto muy pequeño, propiedad muy utilizada en microscopía.

Haces Hermite y Laguerre-Gaussiano

Otros tipos de haces son conocidos como haces Hermite y Laguerre-Gaussiano,⁷ los que son obtenidos analíticamente al solucionar la ecuación de Helmholtz en aproximación paraxial en los sistemas coordenados rectangular y circular cilíndrico respectivamente. Los haces Hermite-Gaussiano suelen ser usados para describir los modos transversales eléctricos y magnéticos (modos TEM_{mn}) de un resonador láser, lo cual indica la distribución de los campos eléctricos y magnéticos de acuerdo al modo de oscilación dentro del resonador. La figura 6 muestra estos modos, la figura 7 presenta los modos Laguerre-Gaussianos.

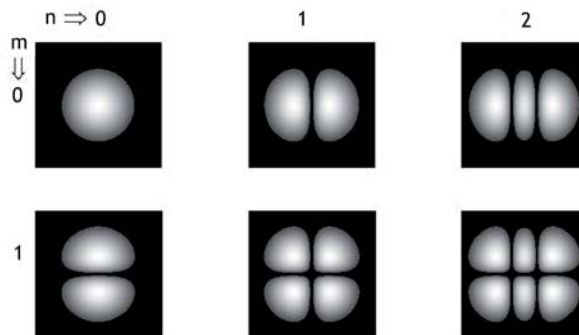


Fig. 6. Perfiles de intensidad de los haces Hermite-Gaussianos.

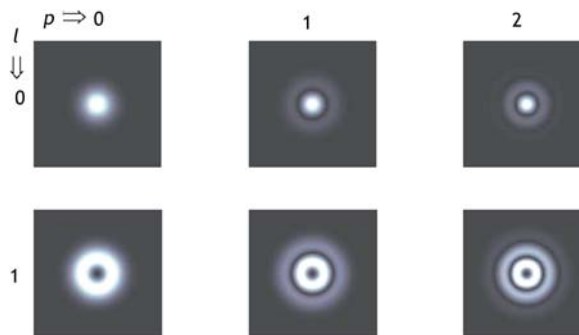


Fig. 7. Perfiles de intensidad de los haces Laguerre-Gaussianos.

Haces invariantes

Existe otro tipo de haces altamente especializados que poseen la propiedad de no cambiar su perfil de intensidades durante la propagación a lo largo de una longitud finita de propagación. Tales haces se conocen como “invariantes”, entre los cuales están los haces Bessel⁸ y Mathieu,⁹ que son la solución de la ecuación de Helmholtz en coordenadas circulares y elípticas cilíndricas respectivamente. La figura 8 muestra los perfiles de intensidad de estos dos tipos de haces invariantes. El haz Bessel genera un patrón de círculos concéntricos que se extiende hasta el infinito. Al hacer una ligera modificación al sistema coordenado circular cilíndrico éste se puede transformar en elíptico cilíndrico, provocando el cambio en los perfiles de intensidad como lo muestra la figura 8.

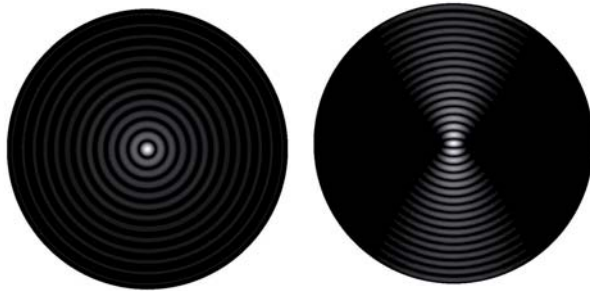


Fig. 8. Perfil de intensidades de los haces, izquierda, Bessel y derecha, Mathieu.

MODIFICANDO PROPIEDADES AL HAZ GAUSSIANO

Es común que los sistemas láser tengan un resonador formado por espejos con superficie esférica con el fin de tener un sistema más estable y con menores pérdidas. Este tipo de resonadores siempre generan un haz cuya fase es una superficie parabólica que, cerca del eje de propagación, se aproxima a una esfera, tal como un haz Gaussiano cuyas características se muestran en la figura 1 y su propagación en el espacio libre se muestra en la figura 2. A partir de los haces Gaussianos se pueden generar otro tipo de haces con frentes de onda y perfiles de amplitud especializados.

Un primer ejemplo se puede lograr al hacer incidir un haz Gaussiano sobre una lente convergente, con esto podemos modificar la escala de las características de este haz, lo que comúnmente se conoce como enfoque del haz, que implica el cambiar el tamaño de la cintura del haz. La figura 9 muestra el efecto

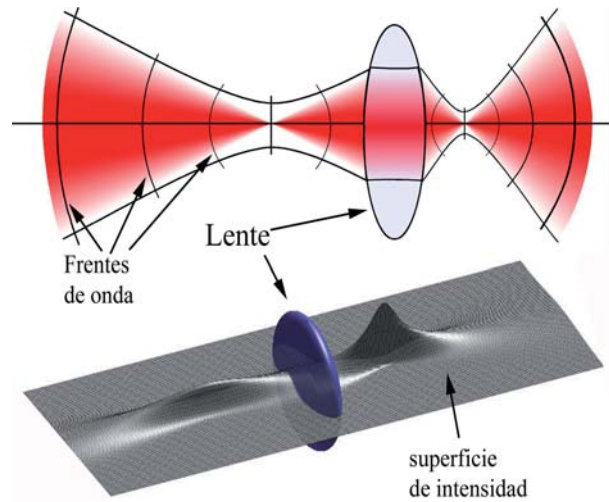


Fig. 9. Propagación de un haz Gaussiano y su interacción con una lente convergente. Superior, frentes de onda, inferior, comportamiento de la intensidad de la luz.

de la interacción del haz Gaussiano con una lente convergente, siendo esta la forma más básica de modificar los frentes de onda del haz, esto es, cambiar la curvatura de los frentes de onda a una más pequeña y provocar el enfoque del haz.

En general se le llama placa de fase a algún elemento óptico que modifica el frente de onda del haz incidente, en este caso el Gaussiano. Las curvaturas de las superficies de tales placas definirán el nuevo frente de onda y el perfil de intensidades del haz transformado. Como ya se mencionó, el caso más usado es la placa con superficies esféricas (lente), que modifica los frentes de onda esféricos a otros iguales, pero con diferente radio de curvatura, dejando el haz Gaussiano con las mismas características, pero a una escala diferente.

Este efecto es ampliamente utilizado en el área de microscopía, y recientemente en el área de manipulación de micro partículas con pinzas ópticas,^{10,11} donde una de las fuerzas que manipula las partículas es producida por el gradiente de intensidad de la luz, el cual es muy marcado en un haz altamente enfocado. Este efecto también es aprovechado en el enfriamiento de átomos por medio de transferencia de momentum lineal, donde se logran alcanzar temperaturas del orden de micro Kelvin, o el llamado condensado de Bose-Einstein.^{12, 13}

Al cambiar las superficies de la placa por un plano y un semi-cono (llamado axicon, o lente cónica), ésta

modifica los frentes de onda planos a cónicos y el perfil de intensidades a uno descrito por la función de Bessel, esta es una de las formas de crear un tipo de haces invariantes.¹⁴

Con un par de placas con superficies plano-circulares cilíndricas (lente cilíndrica) se puede cambiar un frente de onda plano a helicoidal¹⁵ (figura 10). Con este tipo de frente de onda la luz puede ceder energía a partículas a través de la transferencia de momentum angular, efecto usado en la técnica de pinzas ópticas para hacer girar micro partículas y arreglos de estas a manera de engranes. Este efecto se logra también con una placa de fase donde su superficie es un helicoides.¹⁶

Una forma diferente de cambiar las propiedades de un haz de luz es hacerlo pasar por un holograma, el cual almacena información de fase aparte de la información de intensidades que almacena la fotografía común. Actualmente es común el uso de hologramas generados por computadora,¹⁷ con los cuales se pueden reproducir haces cuyo perfil de intensidades puede tomar prácticamente la forma de cualquier objeto.

Para fabricarlos se simula la interferencia entre una onda de referencia (comúnmente, una onda plana) y el haz (u objeto) que se desea reproducir, con esto se obtiene el holograma, el siguiente paso es transferirlos en algún material para que puedan ser reproducidos al iluminarlo con un haz (por ejemplo Gaussiano). Este proceso puede realizarse por medio de diferentes técnicas, siendo la diferencia

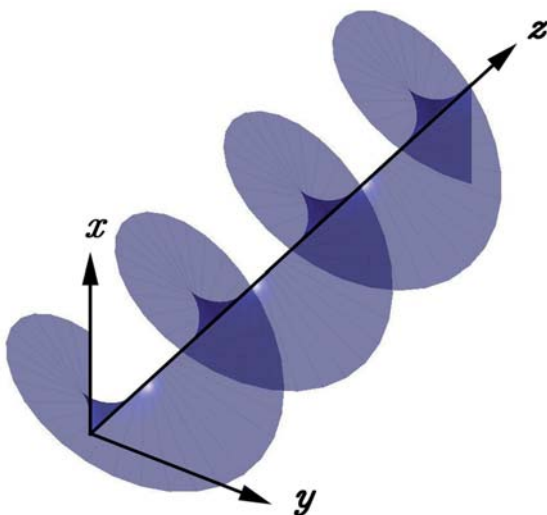


Fig. 10 Frente de onda helicoidal.

entre ellas la resolución del holograma. Una de estas técnicas es la de tomar fotografías a la imagen del holograma y revelar el negativo, con esto se obtiene el holograma, otras técnicas utilizan placas holográficas, litografía tradicional y litografía con haces de electrones.

La figura 11 muestra un ejemplo de holograma generado por computadora para la reproducción de haces Bessel.

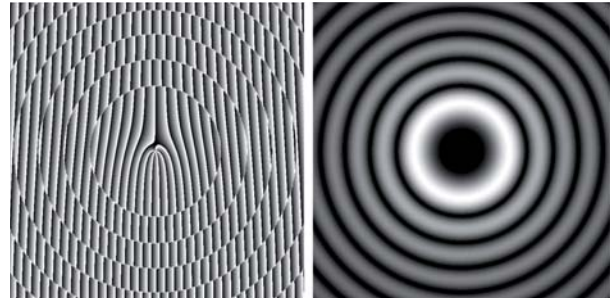


Fig. 11. Derecha, holograma generado por computadora. Izquierda, perfil de intensidades para el haz Bessel de orden 5.

COMENTARIO FINAL

Se presentó una revisión de los haces láser y la forma de cambiar sus propiedades por otras aprovechables para experimentos donde se puede hacer transferencia de energía electromagnética a energía mecánica en objetos del orden de micrómetros. También se aplica al proceso inverso, donde a través de la interacción de la luz con átomos en movimiento, se logra reducir la energía térmica de los átomos por medio de la transferencia de energías en el intercambio de cantidad de movimiento lineal. En general se muestra la ingeniería de haces láser, esto es, su estudio, manipulación y aplicación para fines prácticos.

REFERENCIAS

1. Bahaa E. A. Saleh, Malvin C. Teich. *Fundamental of photonics*, John Wiley and Sons, New York, 1991.
2. Anthony E. Siegman. *Lasers*, University Science Books, California, 1989.
3. Joseph T. Verdeyen. *Laser electronics*, Prentice Hall, New Jersey, 1995.
4. Orazio Svelto. *Principles of lasers*, Springer, New York, 1998.

5. William T. Silfvast. *Laser fundamentals*, Cambridge, United Kingdom, 2004.
6. G. Rodríguez-Morales and S. Chávez-Cerda. Exact nonparaxial beams of the scalar Helmholtz equation. *Opt. Lett.* (2004), 29, 430-433.
7. H. Kogelnik and T. Li. Laser beam and resonators. *Proc. IEEE* (1996), 54, 97-114.
8. J. Durning, J. J. Miceli, and J. H. Eberly. Diffraction-free beams. *Phys. Rev. Lett.* (1987) 4, 651-654.
9. J. C. Gutierrez-Vega, M. D. Iturbe-Castillo, and S. Chavez. Alternative formulation for invariant optical fields: Mathieu beams. *Opt. Lett.* (2000) 25, 1493-1495.
10. H. Felgner, O. Muller, and M. Schliwa. Calibration of light forces in optical tweezers. *Appl. Opt.* (1995) 34, 977-982.
11. C. D'Helon, E. W. Dearden, H. Rubinsztein-Dunlop and N. R. Heckenberg. Measurement of the optical force and trapping range of a single-beam gradient optical trap for micron-sized latex spheres. *J. Mod. Opt.* (1994) 41, 595-601.
12. T. W. Hansch and A. L. Schawlow. Cooling of gases by laser radiation. *Opt. Común.* (1975) 13, 68-69.
13. K. B. Davis, M. O. Mewes, M. R. Andrews, N. J. van Duten, D. S. Durfee, D. M. Kurn, and W. Ketterle. Bose-Einstein condensation in a gas of sodium atoms. *Phys. Rev. Lett.* (1995) 75, 3969-3973.
14. J. Arlt, K. Dholakia. Generation of higher-order Bessel beams by use of a fan axicon. *Opt. Común.* (2000) 177 297-301.
15. M. W. Beijersbergen, L. Allen, H. E. L. O. van der Veen and J. P. Woerdman. Astigmatic laser mode converters and transfer of orbital angular momentum. *Opt. Común.* (1993) 96, 123-132.
16. M. W. Beijersbergen, R. P. C. Coerwinkel, M. Kristensen, J. P. Woerdman. Helical-wavefront laser beams produced with spiral phaseplate. *Opt. Común.* (1994) 112, 321-327.
17. T. Seymour. Computer simulated holography and computer generated holograms. *Am. J. Phys* (1995) 64, 472-478.

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE MORELIA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
PROGRAMA DE GRADUADOS EN METALURGIA



XXVII

SIMPOSIO NACIONAL DE

Siderurgia

11, 12 y 13 de noviembre de 2009
Morelia, Michoacán, México.



INFORMACIÓN:

pgarnicag29@msn.com
angel_ramos_banderas@yahoo.com
barretos@prodigy.net.mx

Instituto Tecnológico de Morelia
Programa de Posgrado en Metalurgia
Av. Tecnológico No. 1500
Col. Lomas de Santiaguito
C.P. 58120, Morelia, Michoacán.

Tel. (443) 312-15-70 Ext. 300, 301 y 305