

Modificando
el Perfil
Espacial de la
Luz con un
SLM (Spatial
Light
Modulator)

Cesar D.
Millan V.
201627332,
Asesor:
Alejandra
Valencia

Introducción

Perfil Espacial
de Intensidad

Haces
Laguerre-
Gauss y
Hermite-
Gauss

Spatial Light
Modulator

Producción
de Modos

Modificando el Perfil Espacial de la Luz con un SLM (Spatial Light Modulator)

Cesar D. Millan V. 201627332,
Asesor: Alejandra Valencia

Abril 27 de 2017

Contenido

Modificando
el Perfil
Espacial de la
Luz con un
SLM (Spatial
Light
Modulator)

Cesar D.
Millan V.
201627332,
Asesor:
Alejandra
Valencia

Introducción

Perfil Espacial
de Intensidad

Haces
Laguerre-
Gauss y
Hermite-
Gauss

Spatial Light
Modulator

Producción
de Modos

- 1 Introducción
- 2 Perfil Espacial de Intensidad
- 3 Haces Laguerre-Gauss y Hermite-Gauss
- 4 Spatial Light Modulator
- 5 Producción de Modos
- 6 Conclusiones
- 7 Referencias

Introducción

Modificando
el Perfil
Espacial de la
Luz con un
SLM (Spatial
Light
Modulator)

Cesar D.
Millan V.
201627332,
Asesor:
Alejandra
Valencia

Introducción

Perfil Espacial
de Intensidad

Haces
Laguerre-
Gauss y
Hermite-
Gauss

Spatial Light
Modulator

Producción
de Modos

Conocer el perfil de intensidad espacial de la luz permite entender la evolución de propagación de un haz en el espacio libre o en un medio. Existen perfiles con *patrones* que se pueden caracterizar, tales como los *modos espaciales*, y otros que son de tipo *aleatorio* como los *campos Speckle*. Este trabajo pretende la generación y detección de perfiles espaciales de luz modificando la fase en un haz, por medio de un SLM.

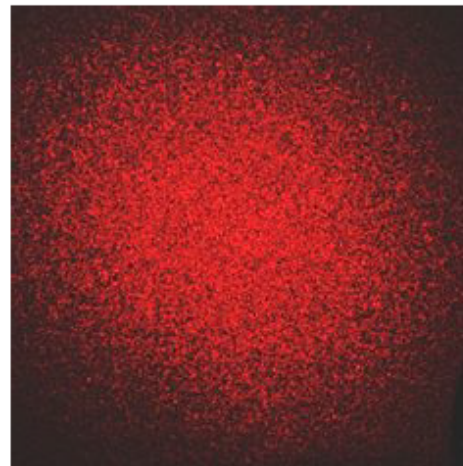


Figura: 1.Campo *Speckle*. Tomada de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Objective_speckle.jpg



Perfil Espacial de Intensidad

Modificando
el Perfil
Espacial de la
Luz con un
SLM (Spatial
Light
Modulator)

Cesar D.
Millan V.
201627332,
Asesor:
Alejandra
Valencia

Introducción

Perfil Espacial
de Intensidad

Haces
Laguerre-
Gauss y
Hermite-
Gauss

Spatial Light
Modulator

Producción
de Modos

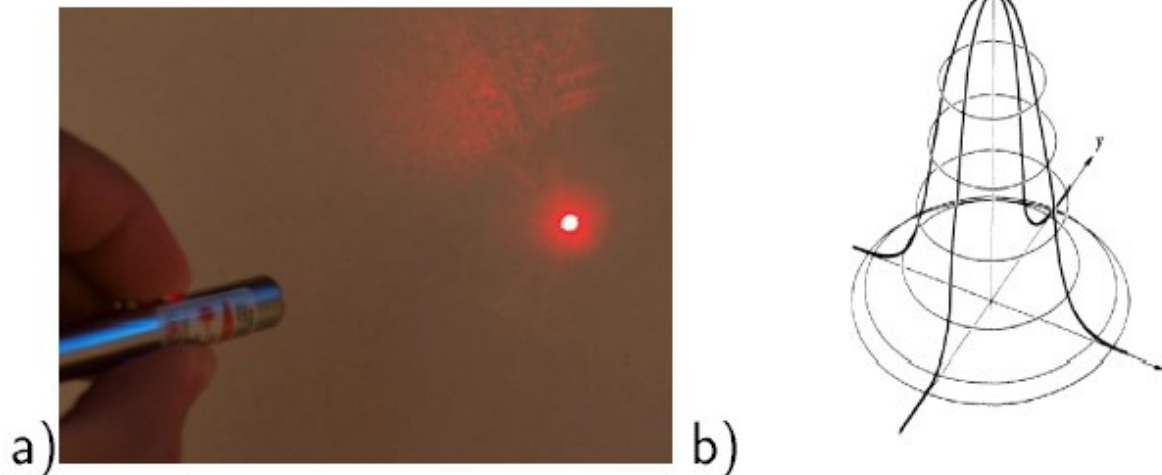


Figura: 3. a) Luz láser. Tomada de <https://www.mydogtag.com/images/photo/acc-laserled-laseron.jpg>
b) Distribución espacial de Intensidad. Tomada de [2]

Ecuación de Onda

Modificando
el Perfil
Espacial de la
Luz con un
SLM (Spatial
Light
Modulator)

Cesar D.
Millan V.
201627332,
Asesor:
Alejandra
Valencia

Introducción

Perfil Espacial
de Intensidad

Haces
Laguerre-
Gauss y
Hermite-
Gauss

Spatial Light
Modulator

Producción
de Modos

La luz como onda es gobernada por la ecuación

$$(\nabla^2 - \frac{\partial^2}{\partial t^2})\tilde{E}(x, y, z, t) = 0, \quad (1)$$

Si es considerada la propagación en una dirección arbitraria, por ejemplo en z , podemos escribir

$$\tilde{E}(x, y, z, t) = \tilde{u}(x, y, z) \exp(ikz - \omega t),$$

bajo la anterior consideración, se obtiene el mismo resultado si $\tilde{E}$ se escribe como

$$\tilde{E}(x, y, z) = \tilde{u}(x, y, z) \exp(ikz) \quad (2)$$

y la ecuación de onda como

$$(\nabla^2 + k^2)\tilde{E}(x, y, z) = 0, \quad (3)$$

es conocida como la ecuación de Helmholtz.

Aproximación Paraxial

Modificando
el Perfil
Espacial de la
Luz con un
SLM (Spatial
Light
Modulator)

Cesar D.
Millan V.
201627332,
Asesor:
Alejandra
Valencia

Introducción

Perfil Espacial
de Intensidad

Haces
Laguerre-
Gauss y
Hermite-
Gauss

Spatial Light
Modulator

Producción
de Modos

De las expresiones 2 y 3 se tiene

$$\frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial z^2} + 2ik \frac{\partial \tilde{u}}{\partial z} = 0$$

si se considera que la principal dependencia z de $\tilde{E}$ en dirección de propagación, entonces

$$\frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial z^2} \ll \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial y^2} = 2ik \frac{\partial \tilde{u}}{\partial z}, \quad (4)$$

la ec.4 es la *aproximación paraxial*. Entonces la *ecuación de onda paraxial* es

$$\frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial y^2} + 2ik \frac{\partial \tilde{u}}{\partial z} = 0. \quad (5)$$

Aproximación Paraxial

Modificando
el Perfil
Espacial de la
Luz con un
SLM (Spatial
Light
Modulator)

Cesar D.
Millan V.
201627332,
Asesor:
Alejandra
Valencia

Introducción

Perfil Espacial
de Intensidad

Haces
Laguerre-
Gauss y
Hermite-
Gauss

Spatial Light
Modulator

Producción
de Modos

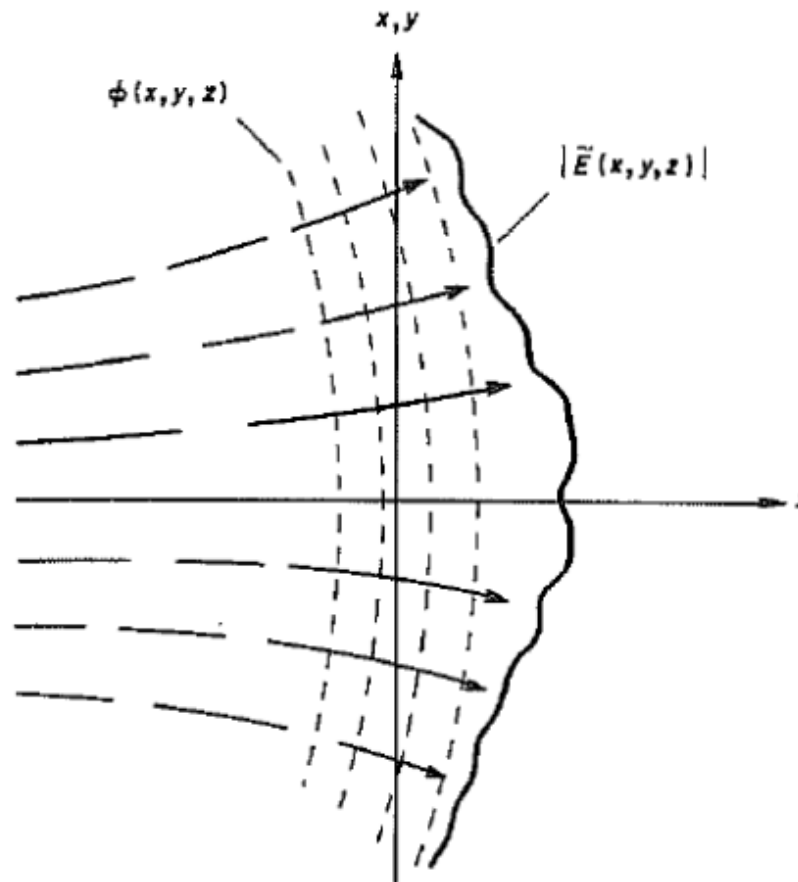


Figura: 4. Aproximación paraxial. Tomadas de [7]

Solución de la ecuación de Onda paraxial

Modificando
el Perfil
Espacial de la
Luz con un
SLM (Spatial
Light
Modulator)

Cesar D.
Millan V.
201627332,
Asesor:
Alejandra
Valencia

Introducción

Perfil Espacial
de Intensidad

Haces
Laguerre-
Gauss y
Hermite-
Gauss

Spatial Light
Modulator

Producción
de Modos

Los modos Hermite-Gauss y Laguerre-Gauss son soluciones exactas a la ecuación 5, pero además matemáticamente las más convenientemente. Así

Modos Hermite-Gauss soluciones en coordenadas cartesianas:

$$\tilde{u}_n(x, z) = \left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/4} \frac{\exp([i(2n+1)\psi(z)])}{2^n n! w(z)} H_n\left(\frac{\sqrt{2}x}{w(z)}\right) \exp\left[ikz - \frac{ikx^2}{2R(z)} - \frac{x^2}{w^2(z)}\right].$$

Modos Laguerre-Gauss soluciones en coordenadas cilíndricas

$$\tilde{u}_n(r, \theta, z) = \sqrt{\frac{2p!}{1+\delta_{0m}}} \frac{\exp(i(2p+m+1)(\psi(z)-\psi_0))}{w(z)} \left(\frac{\sqrt{2}r}{w(z)}\right)^m L_p^m\left(\frac{2r^2}{w^2(z)}\right) \exp\left[-\frac{ikr^2}{2\tilde{q}(z)} - im\theta\right]$$

Simulación de soluciones en Mathematica

Modificando
el Perfil
Espacial de la
Luz con un
SLM (Spatial
Light
Modulator)

Cesar D.
Millan V.
201627332,
Asesor:
Alejandra
Valencia

Introducción

Perfil Espacial
de Intensidad

Haces
Laguerre-
Gauss y
Hermite-
Gauss

Spatial Light
Modulator

Producción
de Modos

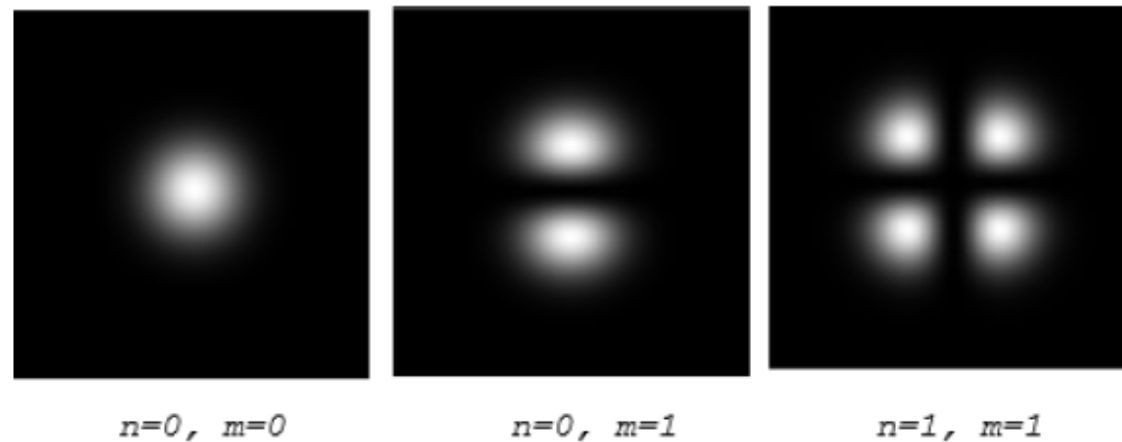


Figura: 5. Modos Hermite-Gauss

Simulación de soluciones en Mathematica

Modificando
el Perfil
Espacial de la
Luz con un
SLM (Spatial
Light
Modulator)

Cesar D.
Millan V.
201627332,
Asesor:
Alejandra
Valencia

Introducción

Perfil Espacial
de Intensidad

Haces
Laguerre-
Gauss y
Hermite-
Gauss

Spatial Light
Modulator

Producción
de Modos

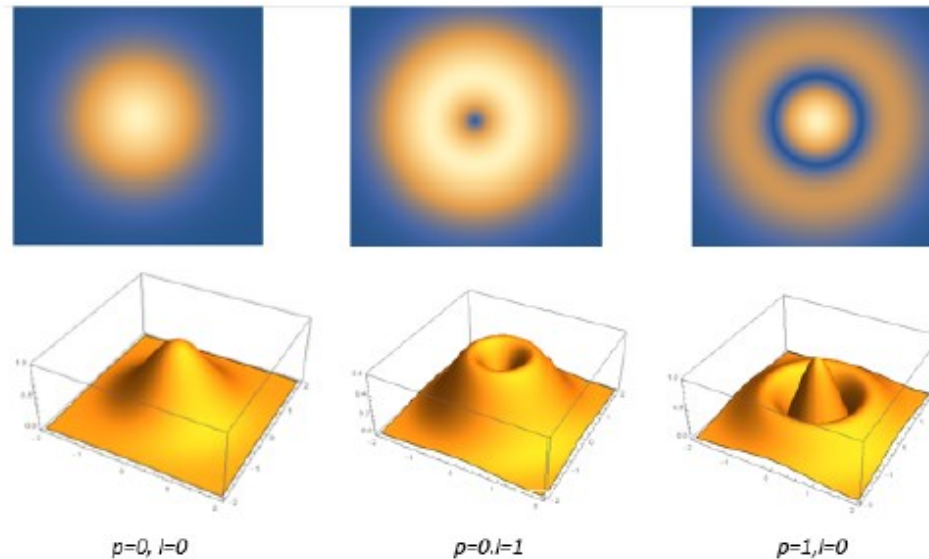


Figura: 6. Modos Laguerre-Gauss

Spatial Light Modulator (SLM)

Modificando
el Perfil
Espacial de la
Luz con un
SLM (Spatial
Light
Modulator)

Cesar D.
Millan V.
201627332,
Asesor:
Alejandra
Valencia

Introducción

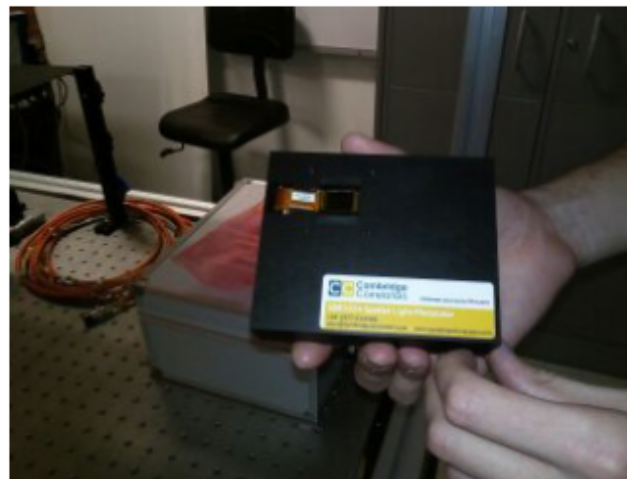
Perfil Espacial
de Intensidad

Haces
Laguerre-
Gauss y
Hermite-
Gauss

Spatial Light
Modulator

Producción
de Modos

Un Modulador espacial de luz (spatial light modulator o SLM) es un dispositivo que modifica en un haz de luz reflejado o transmitido la intensidad, la fase o el estado de polarización. Este dispositivo consiste en una pantalla de cristal liquido (liquid crystal display o LCD) donde se hace incidir un haz que en su reflexión o transmisión ha sido modificado. Que el haz se transmita o refleje depende del tipo de dispositivo. La pantalla es un arreglo cuadrado de pixeles que se modifican por la aplicación de un campo eléctrico. Sus aplicaciones son diversas.



Clasificación de los CL

Modificando
el Perfil
Espacial de la
Luz con un
SLM (Spatial
Light
Modulator)

Cesar D.
Millan V.
201627332,
Asesor:
Alejandra
Valencia

Introducción

Perfil Espacial
de Intensidad

Haces
Laguerre-
Gauss y
Hermite-
Gauss

Spatial Light
Modulator

Producción
de Modos

Los CL pueden clasificarse dependiendo cual es el fenómeno que hace aparecer su naturaleza.

- Los CL liotrópicos (el prefijo lio- proviene del del latín *lyo* que significa desleír) dependen de la concentración de un material en un disolvente
- Los termotrópicos dependerán que ciertos sólidos sean sometidos a temperatura característica y de esta manera cambie sus propiedades.

Fase de los CL (Subclasificación)

Modificando
el Perfil
Espacial de la
Luz con un
SLM (Spatial
Light
Modulator)

Cesar D.
Millan V.
201627332,
Asesor:
Alejandra
Valencia

Introducción

Perfil Espacial
de Intensidad

Haces
Laguerre-
Gauss y
Hermite-
Gauss

Spatial Light
Modulator

Producción
de Modos

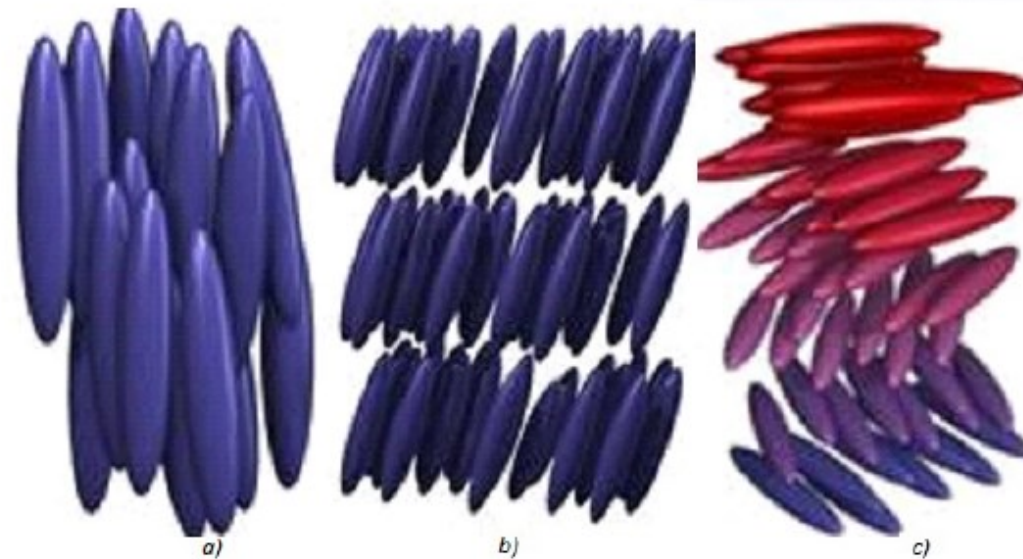


Figura: 10. Fase de los CL Termotrópicos a) Nemática. b) Esmética. c) Quiral. Tomadas y modificadas de <http://pendientedemigracion.ucm.es/info/aocg/PIMCD2009-255/cristalesLiquidos.html>

CL en fotónica

Modificando
el Perfil
Espacial de la
Luz con un
SLM (Spatial
Light
Modulator)

Cesar D.
Millan V.
201627332,
Asesor:
Alejandra
Valencia

Introducción

Perfil Espacial
de Intensidad

Haces
Laguerre-
Gauss y
Hermite-
Gauss

Spatial Light
Modulator

Producción
de Modos

La mayoría de CL usados en fotónica son termotrópicos y especialmente en su fase nemática[1]. La razón se debe a tres propiedades observadas, dos por Mauning en 1911

- La primera: Las moléculas de CL se alinean cuando entran en contacto con una superficie de cristal.
- La segunda: Cuando se ponen en contacto dos superficies de cristal que contienen alineaciones de CL, la rotación del vector director es suave y continua desde una superficie a la otra, este fenómeno es conocido como modo twisted.
- Y una tercera realizada Freedericksz hacia los años treinta donde se muestra que la orientación de las moléculas de CL puede ser manejada por la aplicación de una diferencia de potencial [3].

Modificación de polarización

Modificando
el Perfil
Espacial de la
Luz con un
SLM (Spatial
Light
Modulator)

Cesar D.
Millan V.
201627332,
Asesor:
Alejandra
Valencia

Introducción

Perfil Espacial
de Intensidad

Haces
Laguerre-
Gauss y
Hermite-
Gauss

Spatial Light
Modulator

Producción
de Modos

Si se instalan unos polarizadores en las superficies de cristal (vidrio) que sean paralelos al alineamiento de la molécula la luz viaja en esta dirección (del alineamiento de las moléculas), así se puede cambiar la dirección de polarización. Una aplicación de voltaje cambia la dirección de alineamiento y no permitirá que la luz pase.

Modificación de polarización

Modificando
el Perfil
Espacial de la
Luz con un
SLM (Spatial
Light
Modulator)

Cesar D.
Millan V.
201627332,
Asesor:
Alejandra
Valencia

Introducción

Perfil Espacial
de Intensidad

Haces
Laguerre-
Gauss y
Hermite-
Gauss

Spatial Light
Modulator

Producción
de Modos

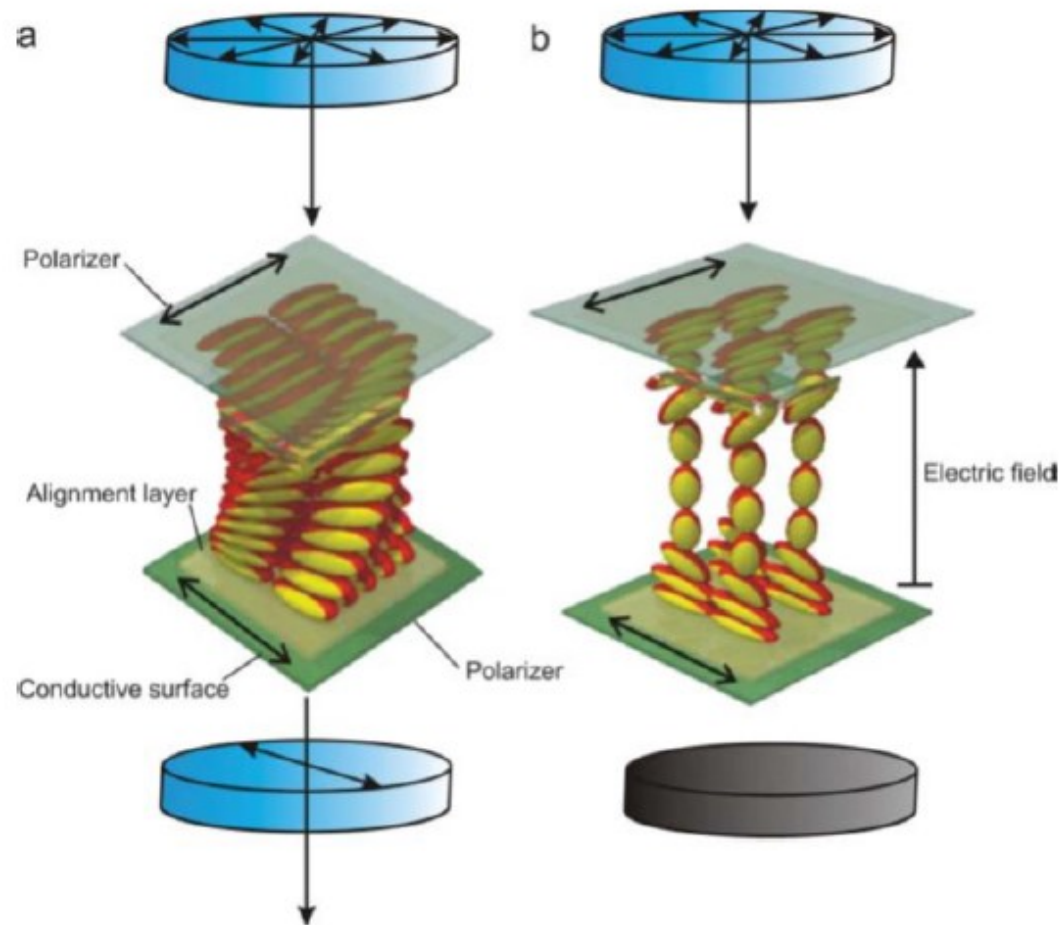


Figura: 12. Principio de operación del CL Twisted-Nematic *a)* off-state. *b)* on-state. Tomada de [3]

Modificación de fase

Modificando
el Perfil
Espacial de la
Luz con un
SLM (Spatial
Light
Modulator)

Cesar D.
Millan V.
201627332,
Asesor:
Alejandra
Valencia

Introducción

Perfil Espacial
de Intensidad

Haces
Laguerre-
Gauss y
Hermite-
Gauss

Spatial Light
Modulator

Producción
de Modos

La aplicación de un campo eléctrico que rota las moléculas hace que el índice de refracción cambie (anisotropía manifiesta en birrefringencia), este es significativamente diferente cuando las moléculas alineadas paralelamente al eje del haz que cuando están alineas perpendicularmente al eje óptico, la diferencia entre estos dos índices es típicamente de $\Delta n = 0,2$

Modificación de fase

Modificando
el Perfil
Espacial de la
Luz con un
SLM (Spatial
Light
Modulator)

Cesar D.
Millan V.
201627332,
Asesor:
Alejandra
Valencia

Introducción

Perfil Espacial
de Intensidad

Haces
Laguerre-
Gauss y
Hermite-
Gauss

Spatial Light
Modulator

Producción
de Modos

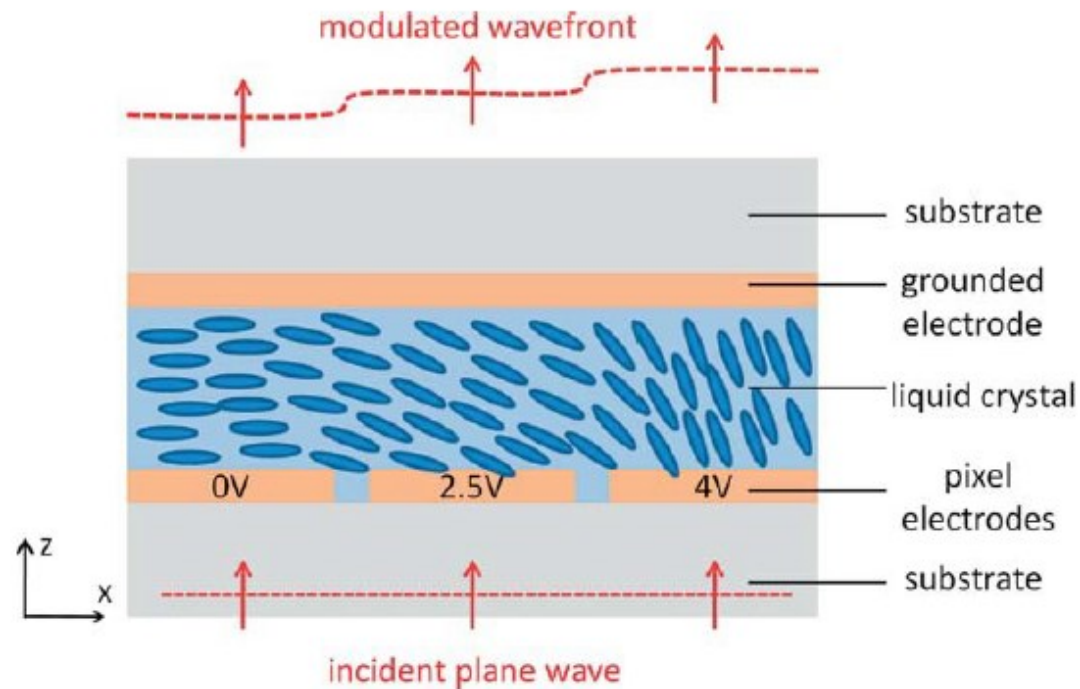


Figura: 13. Frente de onda modulado de una onda polarizada en el eje x . Tomada de [1]

Modificación de fase

Modificando
el Perfil
Espacial de la
Luz con un
SLM (Spatial
Light
Modulator)

Cesar D.
Millan V.
201627332,
Asesor:
Alejandra
Valencia

Introducción

Perfil Espacial
de Intensidad

Haces
Laguerre-
Gauss y
Hermite-
Gauss

Spatial Light
Modulator

Producción
de Modos

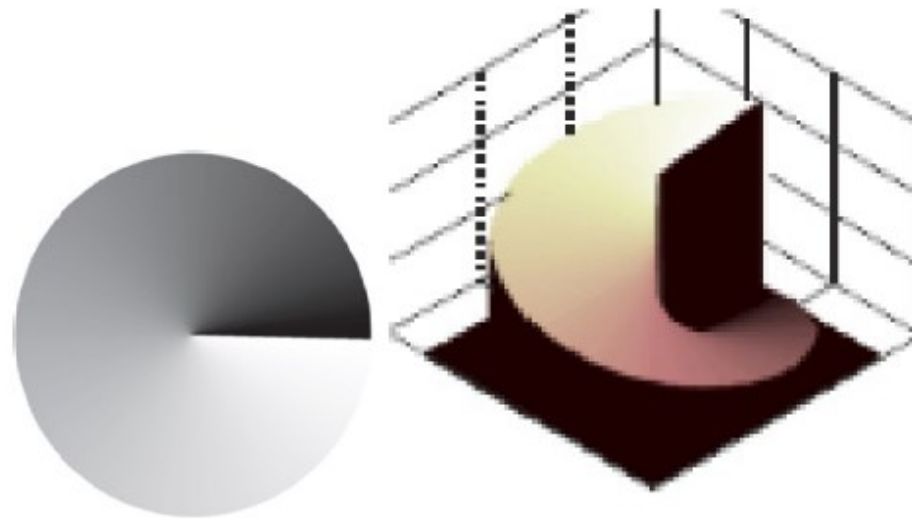


Figura: 14. Rotación de fase. *Izq.* Imagen en un SLM. *Der.* Frente de onda con fase rotada. Tomada de [4]

SDE 1024 SLM de la Universidad de los Andes

Modificando
el Perfil
Espacial de la
Luz con un
SLM (Spatial
Light
Modulator)

Cesar D.
Millan V.
201627332,
Asesor:
Alejandra
Valencia

Introducción

Perfil Espacial
de Intensidad

Haces
Laguerre-
Gauss y
Hermite-
Gauss

Spatial Light
Modulator

Producción
de Modos



Resolution	1024x768
Bit-depth	8-bit
Pixel pitch	9x9um
Reflectance	62% at 633nm
Operating temperature	0-50 degrees Celsius
Active area diagonal	0.45"
Active area dimensions	9.3x7mm
LC	Twisted Nematic Mode
Operating Wavelength	430-650nm
Input Polarisation	Parallel with longest side
Contrast Ratio	350:1
LC response time	200us
Interface	VGA
Input voltage	5V DC
Retardation	~0.8pi at 633nm

Medición de respuesta de fase Fase

Modificando
el Perfil
Espacial de la
Luz con un
SLM (Spatial
Light
Modulator)

Cesar D.
Millan V.
201627332,
Asesor:
Alejandra
Valencia

Introducción

Perfil Espacial
de Intensidad

Haces
Laguerre-
Gauss y
Hermite-
Gauss

Spatial Light
Modulator

Producción
de Modos

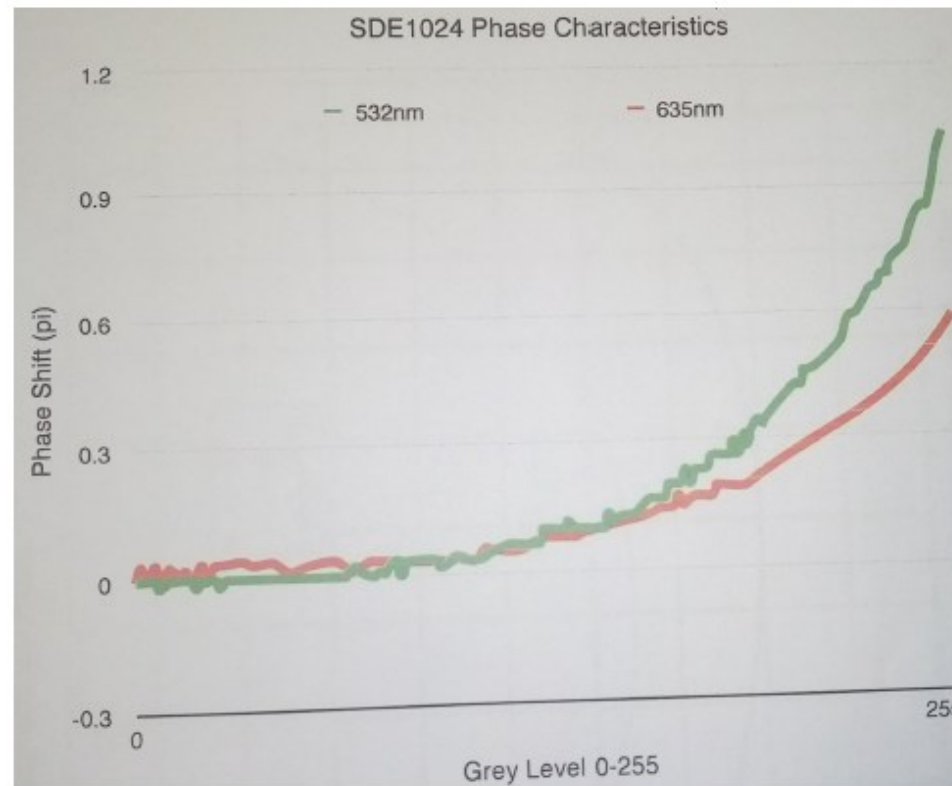


Figura: 16. Respuesta de modificación de fase del SLM.

Esquema del Montaje

Modificando el Perfil Espacial de la Luz con un SLM (Spatial Light Modulator)

Cesar D.
Millan V.
201627332,
Asesor:
Alejandra
Valencia

Introducción

Perfil Espacial de Intensidad

Haces
Laguerre-
Gauss y
Hermite-
Gauss

Spatial Light Modulator

Producción de Modos

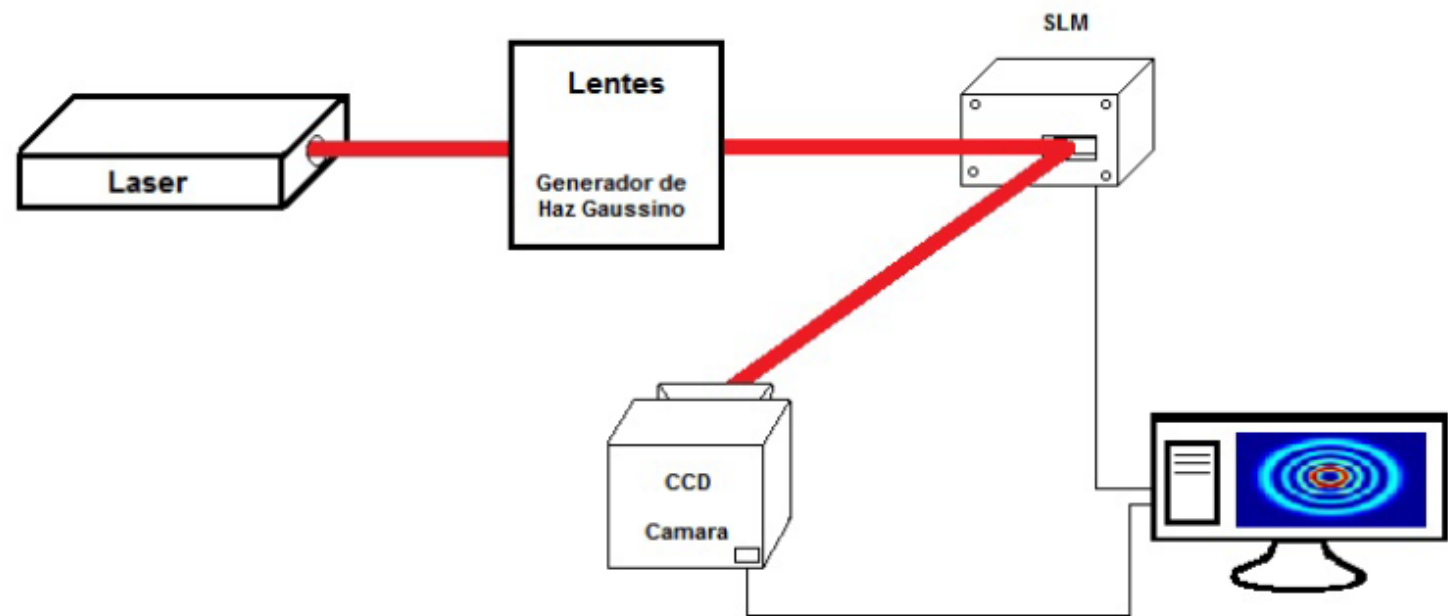


Figura: 17. Montaje: Generación y detección de modos espaciales de luz.

Disposición en el Laboratorio

Modificando
el Perfil
Espacial de la
Luz con un
SLM (Spatial
Light
Modulator)

Cesar D.
Millan V.
201627332,
Asesor:
Alejandra
Valencia

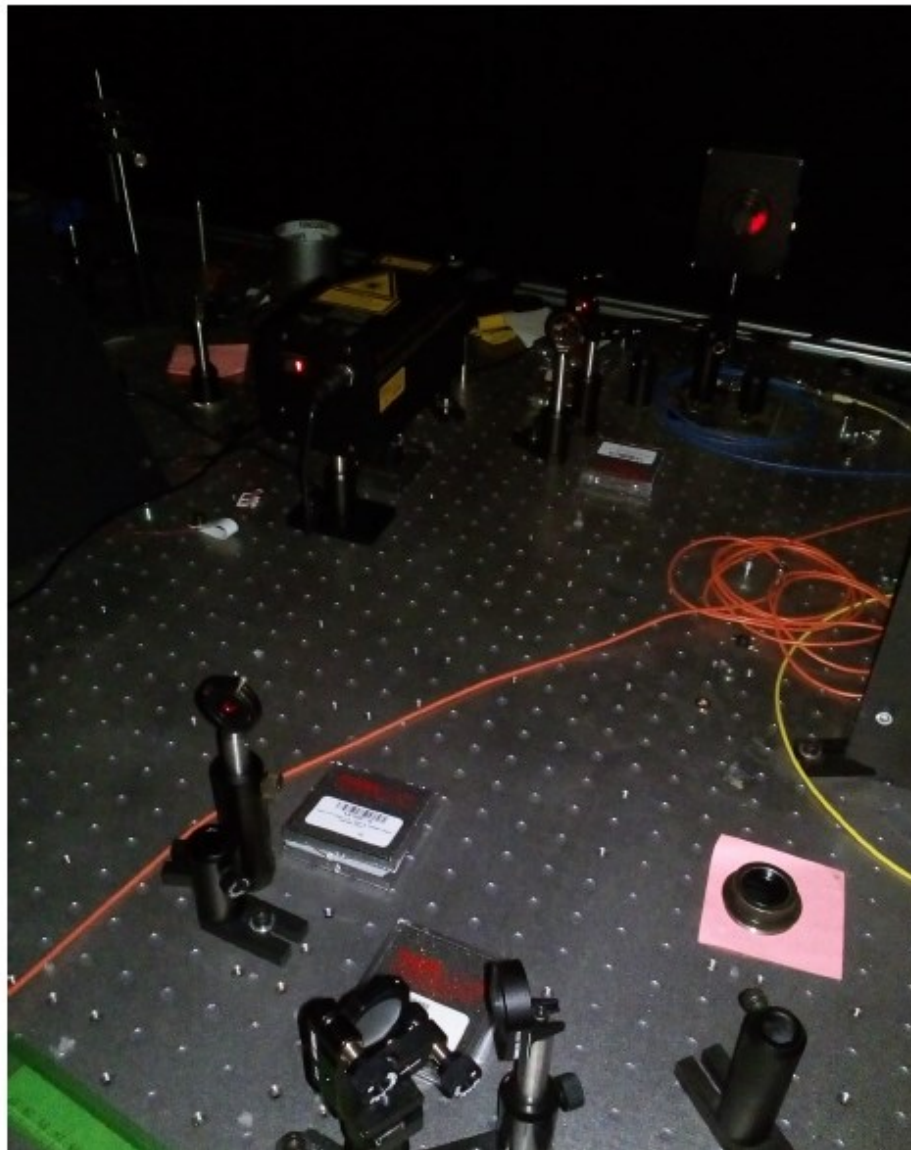
Introducción

Perfil Espacial
de Intensidad

Haces
Laguerre-
Gauss y
Hermite-
Gauss

Spatial Light
Modulator

Producción
de Modos



Lo que muestra el SLM

Modificando
el Perfil
Espacial de la
Luz con un
SLM (Spatial
Light
Modulator)

Cesar D.
Millan V.
201627332,
Asesor:
Alejandra
Valencia

Introducción

Perfil Espacial
de Intensidad

Haces
Laguerre-
Gauss y
Hermite-
Gauss

Spatial Light
Modulator

Producción
de Modos

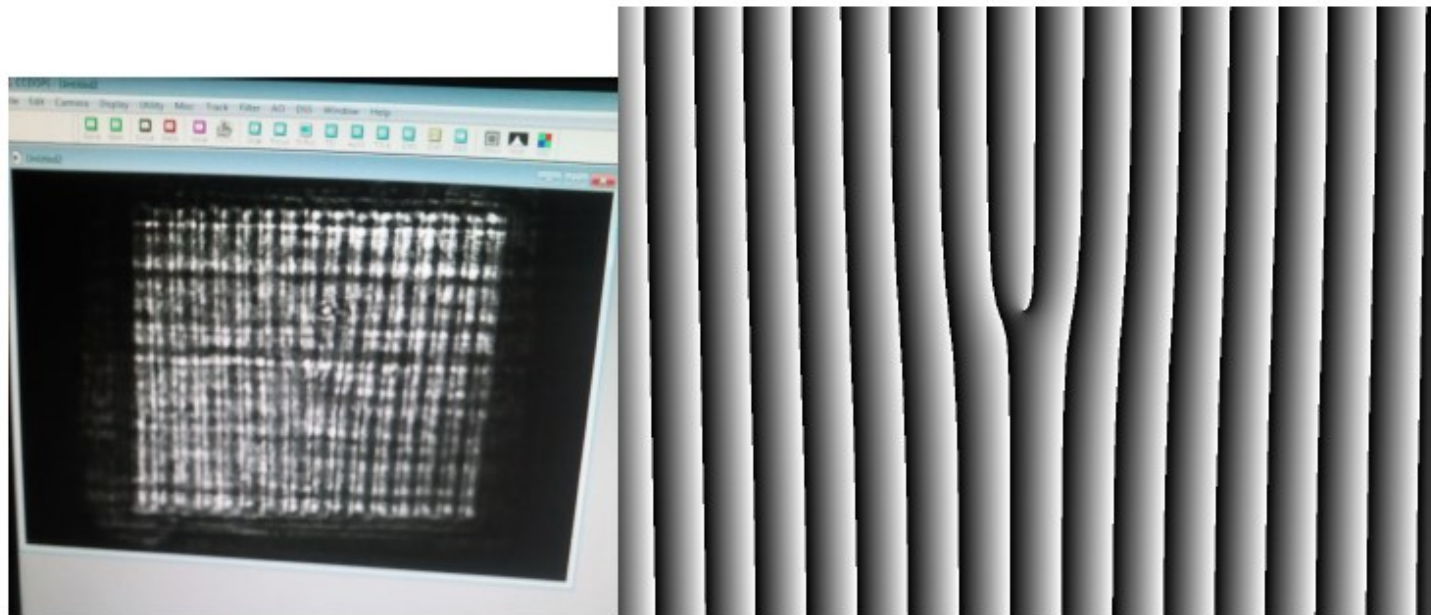


Figura: 19. Izq.Imagen de pantalla LCD del SLM Der. Imagen que se enviá como segunda pantalla

Proyección del haz en una pantalla o pared

Modificando
el Perfil
Espacial de la
Luz con un
SLM (Spatial
Light
Modulator)

Cesar D.
Millan V.
201627332,
Asesor:
Alejandra
Valencia

Introducción

Perfil Espacial
de Intensidad

Haces
Laguerre-
Gauss y
Hermite-
Gauss

Spatial Light
Modulator

Producción
de Modos



Figura: 20. Proyección del haz reflejado en una pantalla.

$$LG_{p=0, l=0}$$

Modificando
el Perfil
Espacial de la
Luz con un
SLM (Spatial
Light
Modulator)

Cesar D.
Millan V.
201627332,
Asesor:
Alejandra
Valencia

Introducción

Perfil Espacial
de Intensidad

Haces
Laguerre-
Gauss y
Hermite-
Gauss

Spatial Light
Modulator

Producción
de Modos

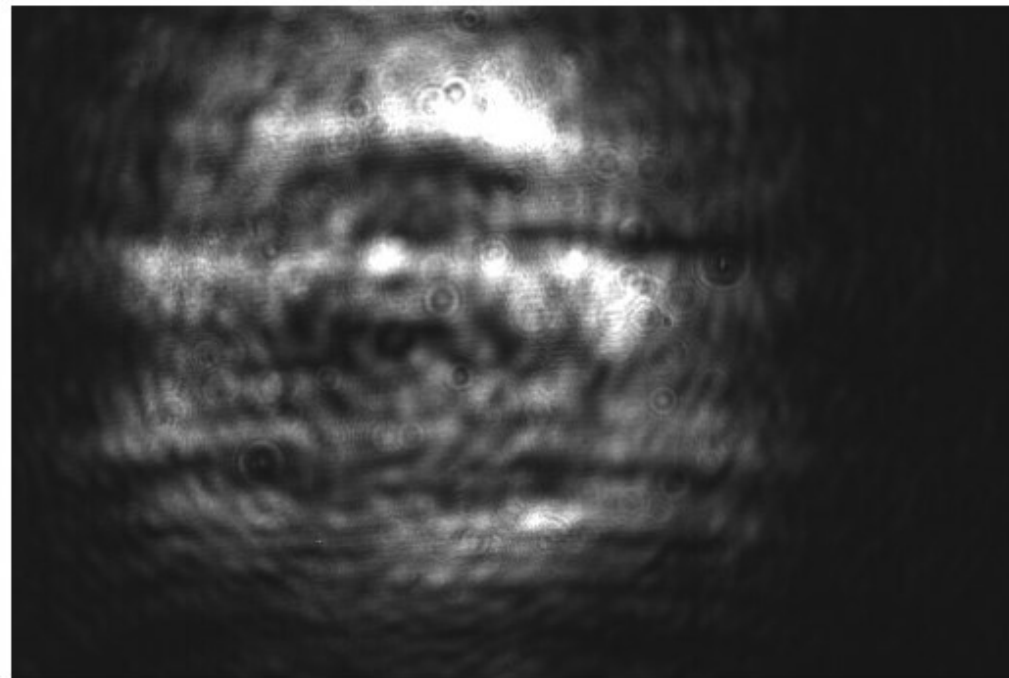


Figura: 21. Haz Gaussiano

LG $p=0, l=5$

Modificando
el Perfil
Espacial de la
Luz con un
SLM (Spatial
Light
Modulator)

Cesar D.
Millan V.
201627332,
Asesor:
Alejandra
Valencia

Introducción

Perfil Espacial
de Intensidad

Haces
Laguerre-
Gauss y
Hermite-
Gauss

Spatial Light
Modulator

Producción
de Modos

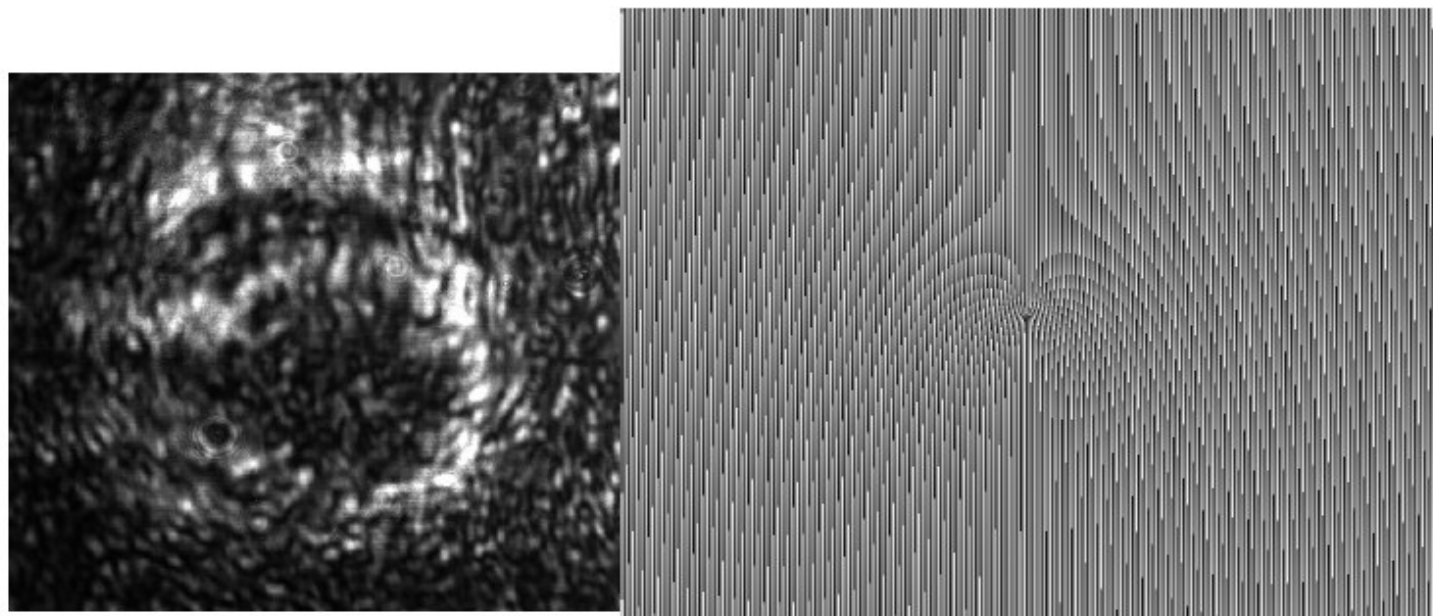


Figura: 22. LG $p=0, l=5$. b) Rejilla generadora

LG $p=0$ - $l=10$, $l=20$, $l=30$

Modificando
el Perfil
Espacial de la
Luz con un
SLM (Spatial
Light
Modulator)

Cesar D.
Millan V.
201627332,
Asesor:
Alejandra
Valencia

Introducción

Perfil Espacial
de Intensidad

Haces
Laguerre-
Gauss y
Hermite-
Gauss

Spatial Light
Modulator

Producción
de Modos

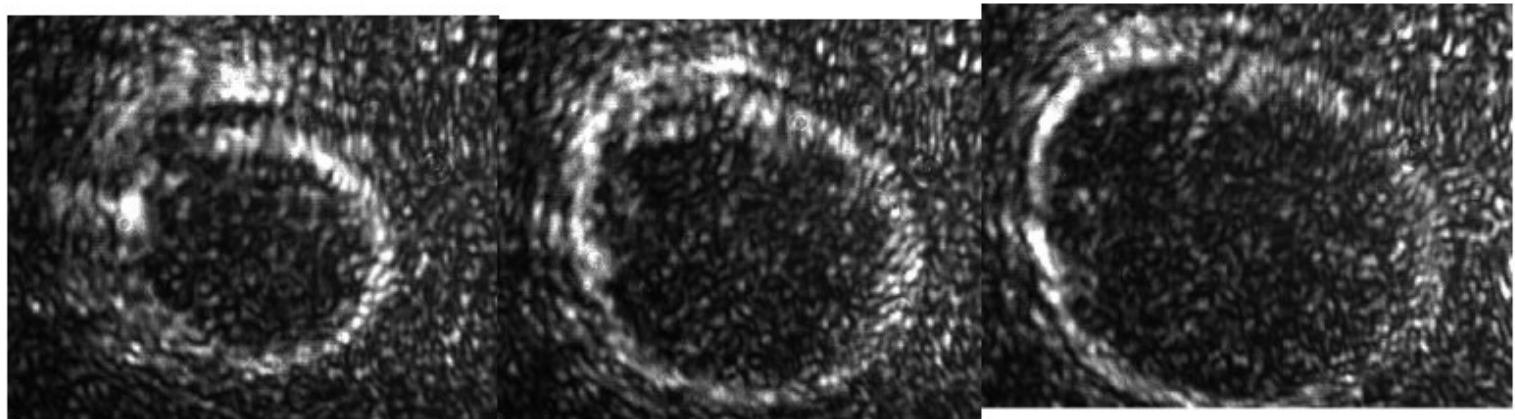


Figura: 23. LG $p=0$ - $l=10$, $l=20$, $l=30$

LG $p=0 - l=30$

Modificando
el Perfil
Espacial de la
Luz con un
SLM (Spatial
Light
Modulator)

Cesar D.
Millan V.
201627332,
Asesor:
Alejandra
Valencia

Introducción

Perfil Espacial
de Intensidad

Haces
Laguerre-
Gauss y
Hermite-
Gauss

Spatial Light
Modulator

Producción
de Modos



Figura: 24. LG $p=0 - l=30$

LG $p=0 - l=90$

Modificando
el Perfil
Espacial de la
Luz con un
SLM (Spatial
Light
Modulator)

Cesar D.
Millan V.
201627332,
Asesor:
Alejandra
Valencia

Introducción

Perfil Espacial
de Intensidad

Haces
Laguerre-
Gauss y
Hermite-
Gauss

Spatial Light
Modulator

Producción
de Modos

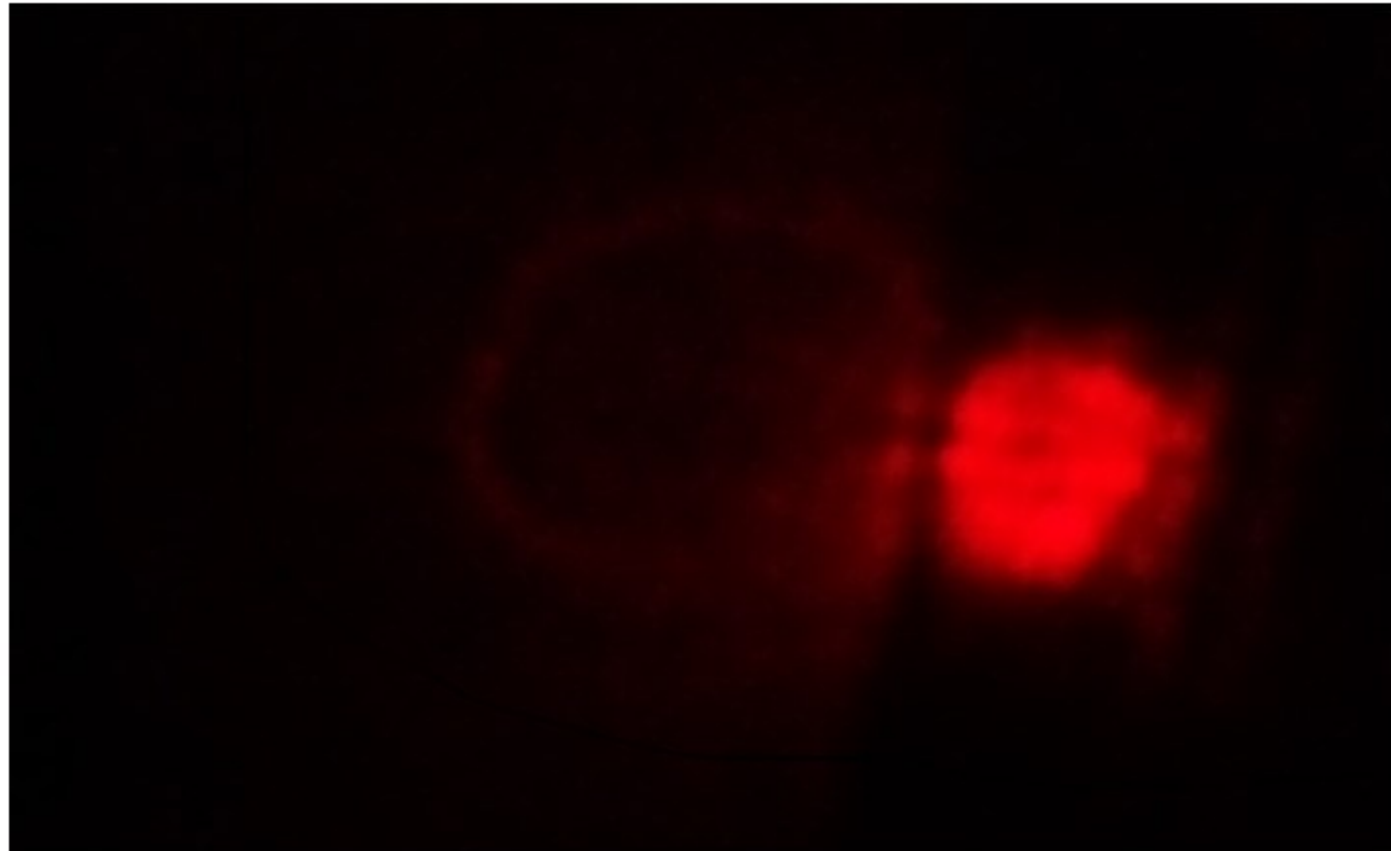


Figura: 25. LG $p=0 - l=90$

LG de orden superior

Modificando
el Perfil
Espacial de la
Luz con un
SLM (Spatial
Light
Modulator)

Cesar D.
Millan V.
201627332,
Asesor:
Alejandra
Valencia

Introducción

Perfil Espacial
de Intensidad

Haces
Laguerre-
Gauss y
Hermite-
Gauss

Spatial Light
Modulator

Producción
de Modos

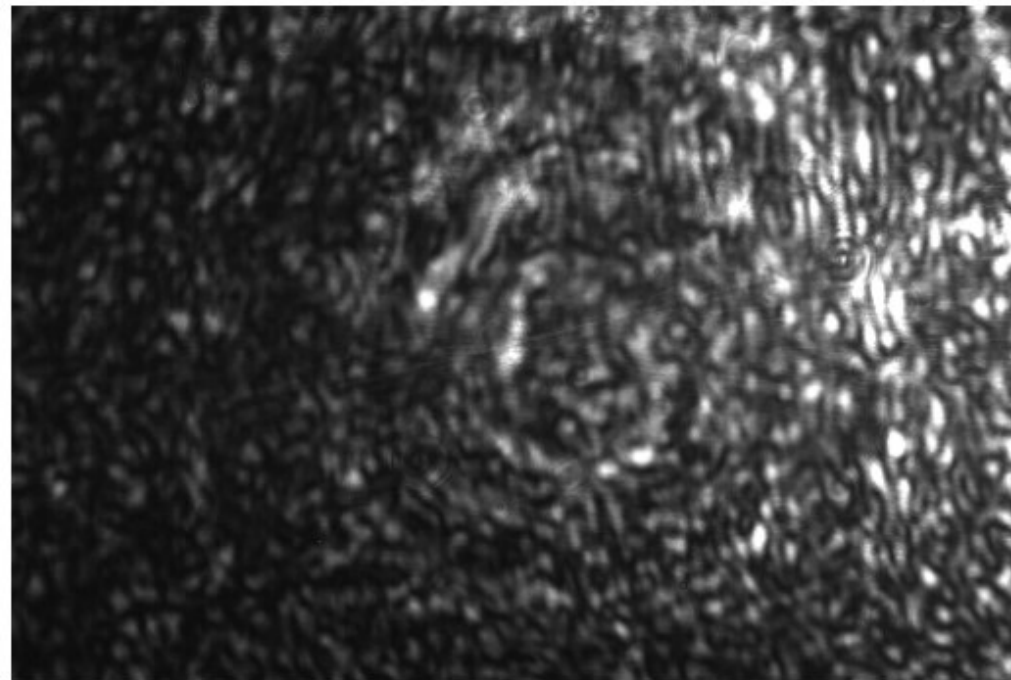


Figura: 26. Izq. LG $p=3, l=3$

LG $p=5, l=5$

Modificando
el Perfil
Espacial de la
Luz con un
SLM (Spatial
Light
Modulator)

Cesar D.
Millan V.
201627332,
Asesor:
Alejandra
Valencia

Introducción

Perfil Espacial
de Intensidad

Haces
Laguerre-
Gauss y
Hermite-
Gauss

Spatial Light
Modulator

Producción
de Modos

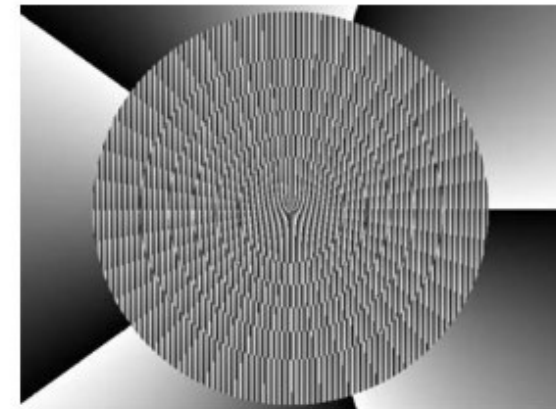
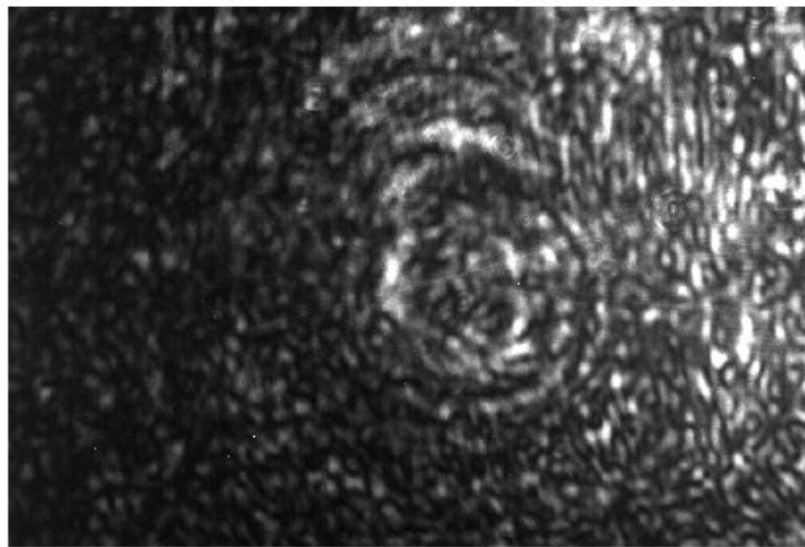


Figura: 27. Izq. LG $p=5, l=5$. Der. *Rejilla generadora* LG_5^5

Patrones arbitrarios

Modificando
el Perfil
Espacial de la
Luz con un
SLM (Spatial
Light
Modulator)

Cesar D.
Millan V.
201627332,
Asesor:
Alejandra
Valencia

Introducción

Perfil Espacial
de Intensidad

Haces
Laguerre-
Gauss y
Hermite-
Gauss

Spatial Light
Modulator

Producción
de Modos

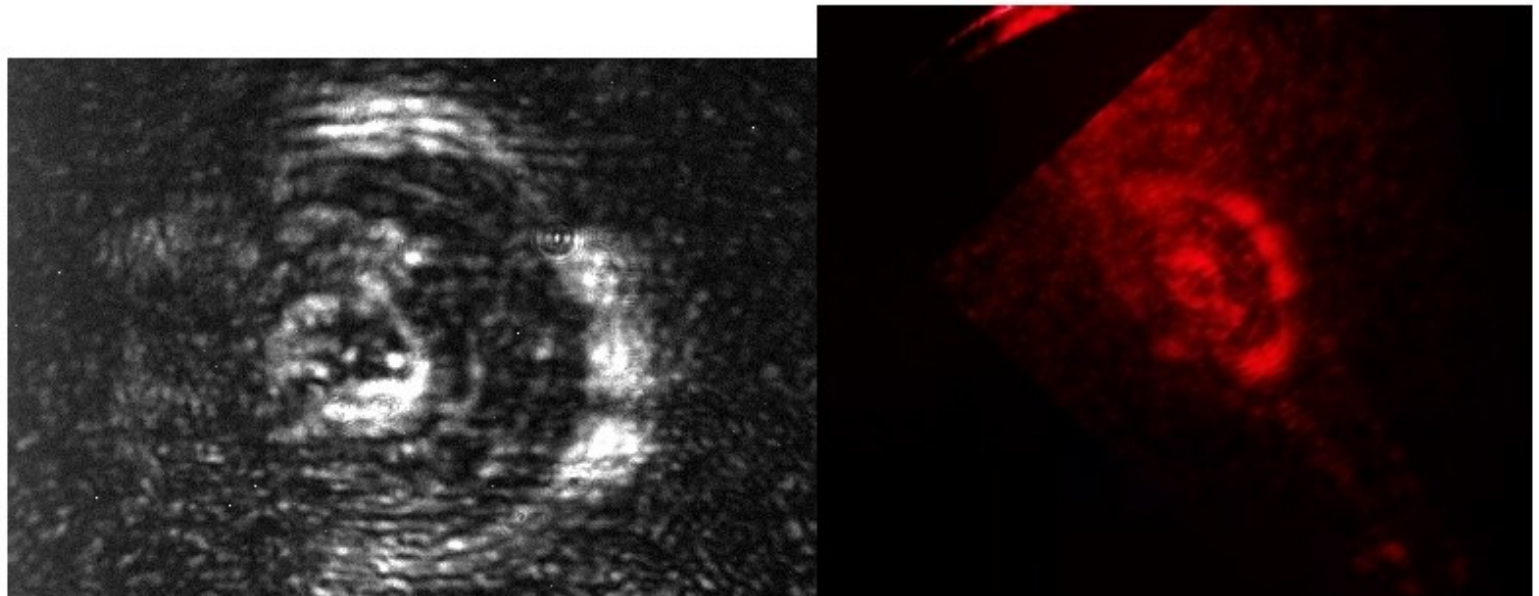


Figura: 28. Arbitrario 1.

Patrones arbitrario

Modificando
el Perfil
Espacial de la
Luz con un
SLM (Spatial
Light
Modulator)

Cesar D.
Millan V.
201627332,
Asesor:
Alejandra
Valencia

Introducción

Perfil Espacial
de Intensidad

Haces
Laguerre-
Gauss y
Hermite-
Gauss

Spatial Light
Modulator

Producción
de Modos

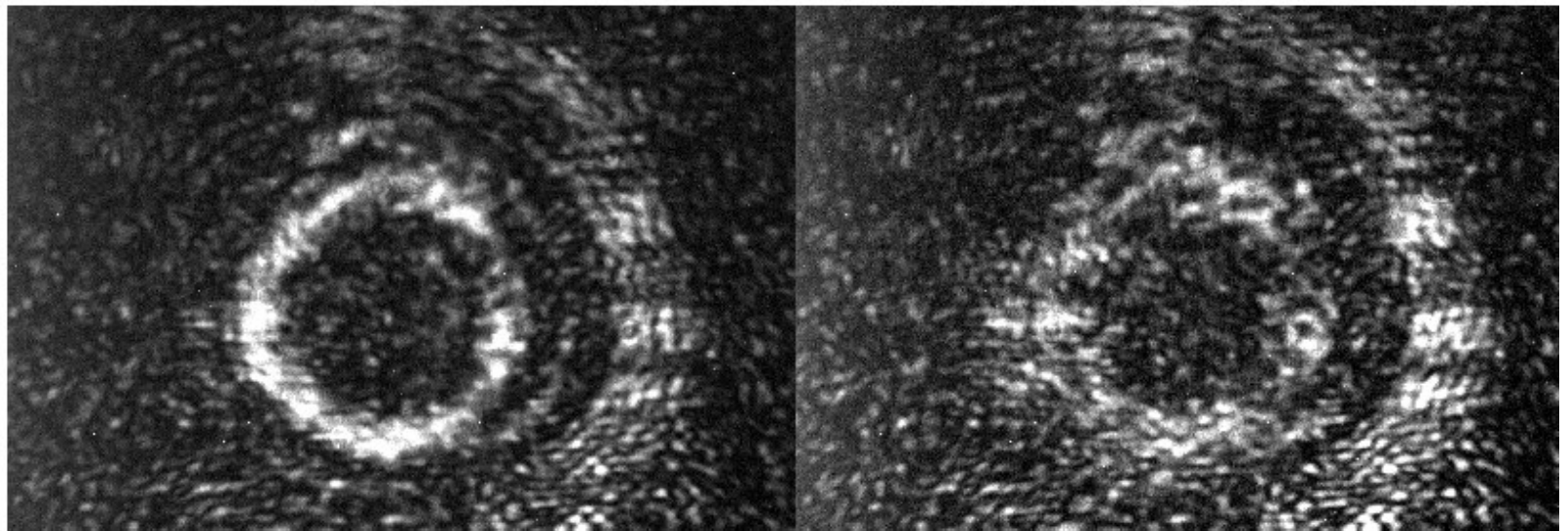


Figura: 29. Arbitrario *Izq.* 1. *Der.* 2.

Generador patrón arbitrario 2 y 3

Modificando
el Perfil
Espacial de la
Luz con un
SLM (Spatial
Light
Modulator)

Cesar D.
Millan V.
201627332,
Asesor:
Alejandra
Valencia

Introducción

Perfil Espacial
de Intensidad

Haces
Laguerre-
Gauss y
Hermite-
Gauss

Spatial Light
Modulator

Producción
de Modos

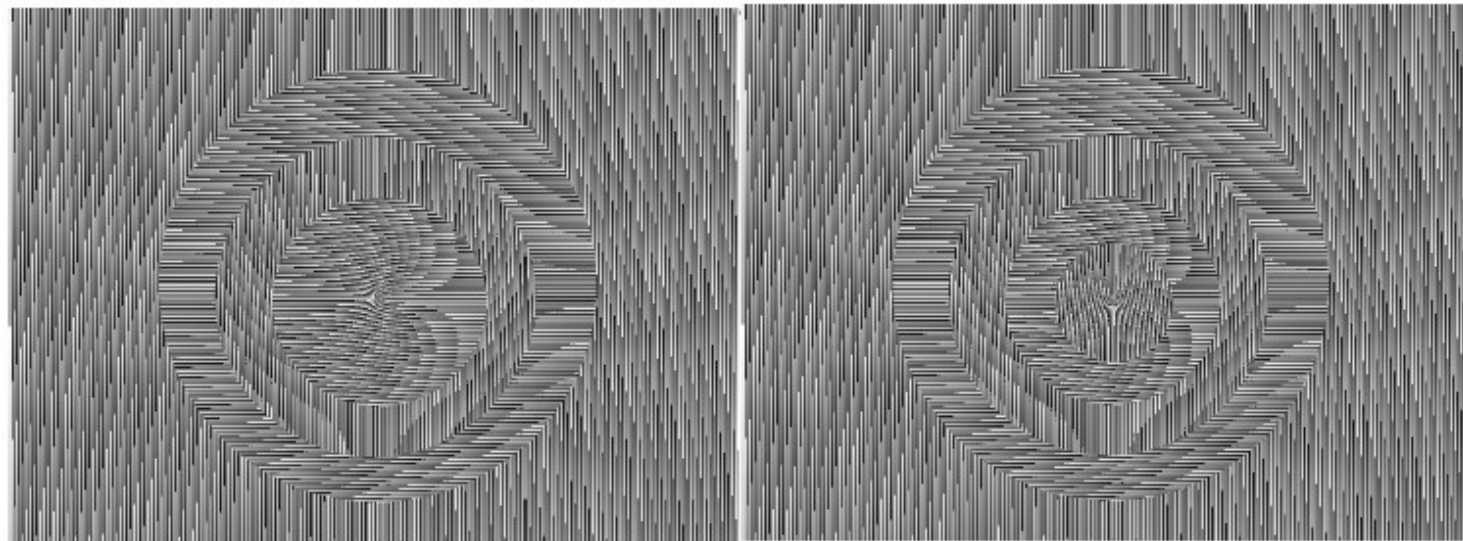


Figura: 30. Generador de patrones arbitrarios 1. y 2. a partir de LG $p=0, l=7$

Arbitrario 4

Modificando
el Perfil
Espacial de la
Luz con un
SLM (Spatial
Light
Modulator)

Cesar D.
Millan V.
201627332,
Asesor:
Alejandra
Valencia

Introducción

Perfil Espacial
de Intensidad

Haces
Laguerre-
Gauss y
Hermite-
Gauss

Spatial Light
Modulator

Producción
de Modos

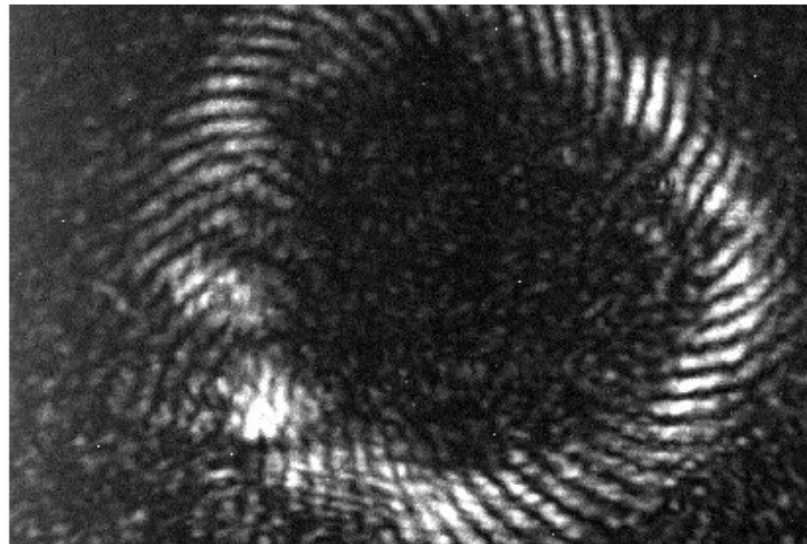


Figura: 31. Arbitrario 4

Modificando el Perfil Espacial de la Luz con un SLM (Spatial Light Modulator)

Cesar D.
Millan V.
201627332,
Asesor:
Alejandra
Valencia

Introducción

Perfil Espacial
de Intensidad

Haces
Laguerre-
Gauss y
Hermite-
Gauss

Spatial Light
Modulator

Producción
de Modos



Conclusiones

Modificando
el Perfil
Espacial de la
Luz con un
SLM (Spatial
Light
Modulator)

Cesar D.
Millan V.
201627332,
Asesor:
Alejandra
Valencia

Introducción

Perfil Espacial
de Intensidad

Haces
Laguerre-
Gauss y
Hermite-
Gauss

Spatial Light
Modulator

Producción
de Modos

- Se comprendió el funcionamiento del SLM SDE 1024

- 1 Se funcionamiento básico

- 2 Manejo y control

- Se modificó el perfil espacial de la luz:

- 1 Se generó modos Laguerre-Gauss en diversos ordenes en sus indices

- 2 Se generaron patrones Arbitrarios

Modificando
el Perfil
Espacial de la
Luz con un
SLM (Spatial
Light
Modulator)

Cesar D.
Millan V.
201627332,
Asesor:
Alejandra
Valencia

Introducción

Perfil Espacial
de Intensidad

Haces
Laguerre-
Gauss y
Hermite-
Gauss

Spatial Light
Modulator

Producción
de Modos



Jeroen Beeckman, Kristiaan Neyts, and Vanbrabant Pieter J. M.

Liquid-crystal photonic applications.

Optical Engineering, 50(8):081202–1 to 081202–17,
August 2011.



Eugene Hecht.

Optics.

Pearson, 2012.



Alan E. Rowan Johan Hoogboom, Theo Rasing and
Roeland J. M. Nolte.

Lcd alignment layers. controlling nematic domain
properties.

Journal of Materials Chemistry, page 1305 to1314, 2006.



S N Khonina, A P Porfirev, and A V Ustinov.

Diffraction patterns with m th order symmetry generated by sectional spiral phase plates.

IOP Publishing, 2015.



Kanghua Lu and Bahaa E.A. Saleh.

Theory and design of the liquid crystal tv as an optical spatial phase modulator.

OPTICAL ENGINEERING, 29(3):240–246, March 1990.



Ricardo C. Pasquali, Carlos Bregni, and Rosa Serrao.

Características e identificación de los cristales líquidos liotrópicos.

Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas, 37(2):38–53, April 2006.



Anthony Siegman.

Lasers.

University Science Books, 1986.