Control of light by sound Control de la luz mediante el sonido

Javier Gamo^{S*}

Division of Science and Engineering, Saint Louis University, Madrid, Spain.

(*) E-mail: gamoaranda@slu.edu

S: miembro de SEDOPTICA / SEDOPTICA member

Received / Recibido: 10/05/2015

Accepted / Aceptado: 10/06/2015

DOI: 10.7149/OPA.48.2.123

ABSTRACT:

The phenomenon of acousto-optical interaction is shown by a simple experiment. Using an acousto-optic modulator recycled from a dismantled industrial laser, a laser pointer, and minimum control electronics, the action of a sound wave injected on the modulator generates the Bragg and Naman-Nath diffraction regimes, depending on the geometry chosen for the interaction between the laser beam and the modulator.

Key words: Optics education, optics experiments, acousto-optics interaction, laser pointer

RESUMEN:

Se presenta el fenómeno de la interacción acusto-óptica, mediante un sencillo experimento. Utilizando un modulador acusto-óptico reciclado de un láser industrial en desuso, un puntero láser, y una mínima electrónica de control, se puede observar cómo la acción de una onda de sonido inyectada sobre el modulador, genera los regímenes de difracción de Bragg y Naman-Nath, en función de la geometría de interacción entre el haz láser y el modulador.

Palabras clave: Educación en óptica, experimentos ópticos, interacción acusto-óptica, puntero láser

Fig. 1. Demostración del fenómeno acusto-óptico, con la aparición de distintos órdenes de difracción, en función de la geometría de interacción (a) régimen Raman-Nath (b) régimen Bragg.

REFERENCES AND LINKS / REFERENCIAS Y ENLACES

- [1] B. E. A. Saleh, M. Teich, *Fundamental of Photonics* (capítulo 20), Nueva York, John Wiley & Sons (1991).
<http://dx.doi.org/10.1002/0471213748>

- [2] J. Gamo, R. Mcleod, P. R. Horche, K. Wagner, "Rapid Reconfiguration in an Acousto-Optic Crossbar Interconnection Network," Proceedings of SPIE vol. 3805, 11-18 (1999).
- [3] J. Gamo, P. R. Horche, W. Hossack, P. Smith, "Ferroelectric Liquid-Crystal Spatial Light Modulator with Acousto-Optic Reading Beam Modulation for Dynamic Holographic Interconnects," Proceedings of 9th Ann. Int. Conf. on Signal Processing Applications & Technologies vol II, 1108-1112 (1998).
- [4] B. G. Boone, Signal processing using optics (capítulo 8), New York, Oxford University Press (1998).
- [5] Gooch & Housego, "Super Q-Switch," <http://goochandhousego.com/product/super-q-switch/>

1. Introducción

El fenómeno acusto-óptico describe la interacción del sonido con la luz [1]. Al lanzar una onda de sonido sobre un medio óptico, éste sufre una perturbación en su índice de refracción. El sonido puede así controlar la luz que incide sobre el medio, el cual pasa a tener una distribución gradual de su índice de refracción. Este hecho, conocido como efecto acusto-óptico, es empleado por distintos dispositivos, tales como deflectores de haz [2], moduladores ópticos [3], y filtros diversos [4].

Dado que las frecuencias ópticas son mucho mayores que las acústicas, el material acusto-óptico con índice de refracción modulado puede considerarse un medio estático inhomogéneo. Dependiendo de la geometría de interacción luz-sonido, se suele distinguir entre los regímenes Raman-Nath y Bragg.

Fig. 2. Régimen Raman-Nath de interacción acusto-óptica

En el régimen de interacción de Raman-Nath (mostrado en la Fig. 2), la incidencia normal del haz óptico de frecuencia $\omega_0 = 2\pi/\lambda_0$ sobre un material acusto-óptico donde se ha inyectado una onda de sonido de frecuencia Ω_s , produce la aparición de varios órdenes de difracción de salida¹. Como todos los órdenes de difracción portan la misma información, en la práctica se suele utilizar la geometría de interacción de Bragg (representada en la Fig. 3), que suprimen los órdenes de difracción superiores, y maximiza la energía óptica en el orden $m = +1$.

La aplicación de las leyes de conservación de la energía y el momento [1] producen de forma sencilla la conocida relación de Bragg

$$\sin \theta_B = \frac{K_s}{2k_o} = \frac{\lambda_o}{2n\Lambda_s}; \quad (1)$$

donde θ_B es el ángulo de desviación interno dentro del cristal (también llamado ángulo de Bragg), n es el índice de refracción del cristal, λ_o es la longitud de onda del haz de luz y $\Lambda_s = V_s/f_s$ es la longitud de onda de la señal acústica.

¹ Los distintos órdenes de difracción sufren un cambio en la frecuencia óptica (ω_0), debido a la superposición de la onda acústica (Ω_s). Así, el orden $m = +1$ tiene una frecuencia $\omega_0 + \Omega_s$, para $m = +2$ se obtiene $\omega_0 + 2\Omega_s$, etc. No obstante, dado que $\omega_0 \gg \Omega_s$, las frecuencias ópticas de las ondas incidente y difractadas pueden considerarse como aproximadamente iguales.

Fig. 3. Régimen de Bragg de interacción acusto-óptica

En este trabajo, se presenta un experimento que permite comprobar el fenómeno acusto-óptico mediante un sencillo montaje experimental. Rotando adecuadamente el dispositivo acusto-óptico, el experimento permite visualizar alternativamente sobre una pantalla los regímenes de difracción de Raman-Nath y Bragg.

2. El montaje experimental

La Fig. 4 muestra el dispositivo acusto-óptico utilizado en este experimento. Se trata de un modulador de Gooch & Housego modelo QS24-4 [5], que actuaba como *Q-Switch* en un láser de Nd:YAG industrial, ya en desuso. Como puede verse en la Fig. 4, este modulador acusto-óptico utilizaba un circuito de refrigeración por agua para disipar el calor producido en el interior de la cavidad del láser de Nd:YAG donde originalmente se encontraba. Sin embargo, en nuestra aplicación el modulador trabaja al aire libre, y aplicaremos una potencia acústica del orden de 1 W, que permite visualizar el funcionamiento del dispositivo como deflector de haz, sin necesidad de refrigeración adicional.

Fig. 4. Modulador acusto-óptico utilizado

La Tabla 1 muestra las principales especificaciones técnicas de este dispositivo. De (1) se observa que el ángulo de desviación θ_B es directamente proporcional a la longitud de onda λ_o del haz luminoso incidente. En nuestro caso, el modulador se va a utilizar en el rango visible, empleando un diodo láser rojo ($\lambda_o \approx 670$ nm), de los utilizados habitualmente como puntero señalador. Por tanto, es de esperar que el ángulo de desviación sea menor que si se utilizase el láser Nd:YAG original ($\lambda_o = 1064$ nm).

Tabla 1. Especificaciones técnicas del modulador utilizado

Parámetro	Valor
Material	SiO ₂
Índice de refracción	1.4
Velocidad acústica en SiO ₂	5960 m/s
Longitud de onda óptica	1047 – 1064 nm
Frecuencia acústica de trabajo	24 MHz
Longitud de onda acústica	248 μm

En todo caso, la desviación existirá, siempre que inyectemos sobre el modulador la onda de sonido adecuada. La Fig. 5 muestra la electrónica de control utilizada. Desde el puerto RS232 de un PC de control se envían tramas de bits con niveles de tensión de +15 V o -15 V. El integrado MAX32 convierte los niveles de tensión RS232 a niveles TTL (0 V – 5 V). A la salida del MAX32, el biestable CD4027BM transforma el último bit de la trama de datos TTL, en un nivel de tensión fijo (0V o 5V), que será el que, finalmente, habilite (5V = 1 lógico) o deshabilite (0V = 0 lógico) la señal acústica de 24 MHz producida por el oscilador. Una vez amplificada esta señal acústica, e inyectada sobre el modulador acusto-óptico, se produce la perturbación en el índice de refracción del cristal. El biestable también controla el encendido del láser emisor (obtenido desmontando un puntero señalador), si bien, por seguridad, la placa dispone también de un interruptor mecánico para habilitar el encendido del láser.

Fig. 5. Electrónica de generación de la señal acústica y control de la emisión láser

Una vez encendido el láser de diodo y aplicada la señal acústica sobre el modulador, basta como utilizar una pantalla colocada a cierta distancia tras el modulador, para poder comprobar los distintos órdenes de difracción, según la geometría de interacción Raman-Nath o Bragg elegida. A partir de (1) y de la Tabla 1, se deduce fácilmente que el ángulo de desviación interno para el orden de difracción $m = +1$ cuando se utiliza el láser Nd:YAG original ($\lambda_o = 1064$ nm) es de 1.53 mrad.

En nuestro caso, utilizaremos un láser de diodo rojo ($\lambda_o \approx 670$ nm), con lo que el ángulo de desviación externo (a la salida del cristal) es:

$$\theta'_{B(670 \text{ nm})} = n \cdot \theta_{B(670 \text{ nm})} = 1.35 \text{ mrad} \quad (2)$$

Dado que este ángulo es suficientemente pequeño, se puede realizar la aproximación:

$$\sin \theta'_B \approx \theta'_B \approx \frac{\Delta x}{2L} \quad (3)$$

Por ejemplo, en el régimen de Bragg, para obtener una separación $\Delta x = 1$ cm entre los órdenes $m = 0$ y $m = +1$ indicados en la Fig. 3, debemos situar la pantalla de visualización a una distancia $L \approx 3.7$ m tras el modulador.

3. Resultados experimentales

Al aplicar sobre el modulador acusto-óptico la señal acústica generada por el circuito de la Fig. 5, e incidir sobre dicho modulador con el haz óptico proveniente del diodo láser, se recogen sobre una pantalla colocada a cierta distancia del modulador las imágenes mostradas en las fotografías de la Fig. 1.

Las fotografías se tomaron con una cámara CANON EOS 350 D (lente focal 24-105 mm). La imagen de la izquierda representa la salida del haz luminoso que atraviesa el dispositivo, bajo incidencia normal. En este caso, aparecen dos órdenes de difracción ($m = +1$ y $m = -1$), uno a cada lado del *spot* central intenso que corresponde al haz luminoso sin difractar (orden $m = 0$). En ese momento, se está bajo el régimen de Raman-Nath representado en la Fig. 2.

Rotando paulatinamente el dispositivo acusto-óptico, se incrementa de forma progresiva la potencia óptica de uno de los haces difractados (por ejemplo, el orden $m = +1$), a la vez que va disminuyendo la intensidad del *spot* simétrico correspondiente ($m = -1$). Cuando la potencia del orden $m = +1$ alcanza su máxima intensidad, se está bajo régimen de interacción de Bragg; esto se comprueba experimentalmente porque desaparece el *spot* simétrico $m = -1$. En esa situación, se está bajo el régimen de interacción de Bragg indicado en la Fig. 3.

Como prueba adicional, se ha medido la Eficiencia de Difracción (DE) de cada régimen, definida como:

$$DE = \frac{I_d}{I_i}, \quad (4)$$

donde I_i es la intensidad óptica del haz luminoso incidente, e I_d es la intensidad óptica del haz difractado en el orden $m = +1$ de difracción.

La Tabla 2 recoge los resultados experimentales obtenidos en cada caso, una vez localizado el régimen de interacción correspondiente mediante el adecuado ajuste de posicionamiento entre el haz láser incidente y el cristal acusto-óptico. Las medidas se realizaron con un medidor de potencia óptica Newport 1830-C, usando un cabezal 818-SL.

Tabla 2. Eficiencia de difracción medida para los distintos regímenes de difracción

Régimen	I_i (μW)	I_d (nW)	DE (%)
Raman-Nath	4.55	68	1.5
Bragg	4.55	98	2.2

Como puede observarse, la eficiencia de difracción no es muy alta, debido a que el dispositivo no está optimizado para funcionar a la longitud de onda del puntero láser utilizado. En todo caso, se comprueba que la eficiencia del régimen de Bragg es superior a la del régimen Raman-Nath, tal y como predice la teoría.

Como paso adicional, se podría mejorar la etapa electrónica, de forma que permita generar una señal acústica con frecuencia y potencia variables en un rango determinado. Mediante el medidor de potencia óptica, se podría verificar cuantitativamente la variación en potencia del haz difractado $m = +1$, en función de la frecuencia y potencia de la señal acústica aplicada, así como de la geometría de interacción entre el haz luminoso incidente y el modulador acusto-óptico. Esto serviría para caracterizar los parámetros del dispositivo acusto-óptico empleado (ancho de banda, tiempo de subida, etc.).