

Diseño de dispositivos MEMS

Redes de difracción programables

Lautaro Martín, Walter J. Aróztegui, José A. Rapallini, Antonio A. Quijano

Centro de Técnicas Analógico-Digitales (CeTAD)

Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de La Plata (UNLP)

La Plata, Argentina

lautaromtin@gmail.com, walter.aroztegui@gmail.com, josrap@gmail.com, adrian.quijano@gmail.com

Resumen—Este trabajo presenta una visión general de redes de difracción para su implementación en microsistemas, en particular a través de tecnologías MEMS, como redes de conmutadores (switches) electrostáticos. Se plantean los conceptos básicos de tales redes, así como las características que se deben tener en cuenta en su fabricación. Finalmente se incluyen dos casos de aplicación en los que las mismas son importantes.

Palabras clave—MEMS, Redes de Difracción, Microsistemas, Conmutadores MEMS.

I. INTRODUCCION

Una Red de difracción es una estructura periódica que afecta la amplitud o la fase de una onda incidente. Típicamente, el periodo de dicha red es varias veces la longitud de la onda incidente. Al analizar una red de difracción, se observa que la onda incidente es difractada en varias direcciones, tal como lo predice la ecuación de Bragg.

Las redes que modulan la amplitud están formadas por cintas alternadas, de materiales absorbentes y reflectantes. Las redes de modulación de fase están constituidas por cintas reflectantes de un mismo material, en posiciones alternadas con respecto al foco de la onda incidente.

Las redes de difracción también se pueden clasificar según transmitan o reflejen las ondas en su superficie, entonces tenemos redes por transmisión o por reflexión. En las primeras, el fenómeno de difracción se puede ver del otro lado de la red, es decir en el semiplano opuesto al de incidencia de la onda, mientras que en las otras el fenómeno se produce dentro del mismo semiplano de incidencia de la onda.

Además de estas clasificaciones las redes pueden ser planas, convexas o cóncavas.

La superficie de la red puede adoptar diferentes geometrías, y todas ellas producen el mismo ángulo de difracción que predice la ley de Bragg. Sin embargo, la distribución de la energía en los diferentes lóbulos es distinta para cada una. La figura 1, muestra las configuraciones típicas para una red de difracción:



Fig. 1 Vista de corte transversal de tres redes de difracción con superficies diferentes.

La forma mostrada en b) es quizá la más empleada, ya que transfiere una gran proporción de la energía de la onda al primer orden de difracción. Sin embargo opera eficientemente en un rango muy estrecho del espectro.

El uso de conmutadores MEMS (MEMS Switches) para la fabricación de redes de difracción, da lugar a redes que operan por modulación de fase, por reflexión, con superficie plana y con forma rectangular.

II. REDES DE DIFRACCIÓN PERIODICAS

A. La ecuación de Bragg

Bragg relaciona el ángulo de la onda reflejada β y el de la incidente α con la longitud de onda λ (m) de la misma, el periodo p (m) de la red y el orden k de la onda reflejada. La ecuación de Bragg está dada por la siguiente expresión (1):

$$k\lambda/p = \sin(\alpha) + \sin(\beta) \quad (1)$$

Un dibujo esquemático de una red de difracción se muestra en fig. 2.

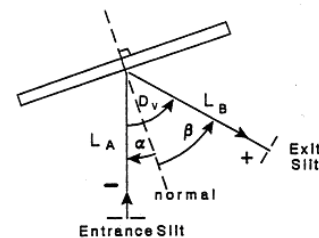


Fig. 2 En ella vemos un haz L_A que ingresa por la rendija de entrada con un ángulo α respecto de la entrada, y L_B es el haz que se difracta con el ángulo β respecto de la normal

Un rayo incidente con ángulo α con respecto a la normal es proyectado en la red de difracción. Se producen rayos de difracción para distintos ordenes según la ecuación de Bragg, donde k representa el orden ($k= 0,1,2,3\dots$). Cuando $k=0$, se tiene la reflexión ordinaria ($\sin(\alpha) = \sin(\beta_0)$) que es exactamente igual al producido por un espejo. Cuando $k \neq 0$, se tiene un ángulo β diferente.

Los efectos de interferencia evitan las reflexiones en ciertos ángulos ya que algunos rayos no están en fase uno con el otro. Así se obtienen rayos resultantes en una serie de ángulos que corresponden a puntos de interferencia constructiva (refuerzo) entre las reflexiones. El número de órdenes de los rayos refractados producidos depende de la relación entre el periodo de la red y la longitud de onda.

B. Dispersión Lineal

La dispersión lineal define el grado en el cual el intervalo espectral es dispersado a través del campo focal de una red de difracción.

La dispersión lineal es asociada con un instrumento capaz de resolver el espectro con cierto detalle.

La dispersión lineal perpendicular al haz difractado en la longitud central λ está dada la ecuación (2).

$$\frac{d\lambda}{dx} = \frac{\cos \beta}{kn L_B} \quad (2)$$

Donde L_B es la longitud focal de salida, dx es el intervalo en el plano focal y n es la inversa del periodo p .

Una definición más útil para el diseño de una red es la inversa de la ecuación (2).

C. Poder de resolución

El poder de resolución R indica la capacidad de una red de difracción para diferenciar dos longitudes de onda cercanas. La ecuación (3) da una expresión para R .

$$R = \lambda/\Delta\lambda = k/P \quad (3)$$

Donde λ y $\lambda + \Delta\lambda$ son las longitudes incidentes en la red de difracción. P es el número de periodos espaciales de la red que son iluminados por ambos rayos.

III. REDES DE DIFRACCIÓN VARIABLES

A. Conmutador MEMS

Un conmutador MEMS está conformado por dos planos conductores enfrentados entre sí. Generalmente los planos son de forma rectangular. El plano inferior esta fijo, el plano superior puede tener fijo uno o dos de sus extremos. Cada

plano metálico es un electrodo, y en conjunto hacen las veces de un capacitor. Cuando se aplica una tensión continua entre ambos aparecen fuerzas electroestáticas entre los planos que provocan la deflexión de la placa con capacidad de movimiento.

Considerando ahora un conmutador de dos extremos fijos, si la fuerza entre los planos es suficiente, el plano superior se deformará en su parte central reduciendo la distancia con el plano inferior, y retomando su posición original cuando la tensión desaparece.

B. Redes de difracción variables

Si colocamos una serie de conmutadores MEMS en paralelo unos con otros, entonces el electrodo superior de cada uno de ellos pasa a ser lo que llamaremos una cinta de la red de difracción. Cada cinta es de un material metálico que además de actuar como electrodo, tiene la propiedad de reflejar ciertas longitudes de onda de un rayo que incide sobre su superficie.

De esta forma podemos aplicar una tensión en cada conmutador y generar un desplazamiento en cada cinta de la red. Las diferencias de altura entre las cintas generan los fenómenos de interferencia y producen el fenómeno de difracción. Si la configuración de las cintas es periódica, se puede estudiar el fenómeno de difracción mediante la ley de Bragg.

IV. PELICULAS REFLECTANTES

La superficie de las cintas tiene que ser de un material reflectante, y el metal utilizado determina la reflexión característica de la superficie. Uno de los materiales más utilizados es el aluminio, que es económico, y tiene una reflectancia de alrededor de 88%-92% en todo el espectro visible. Otro material utilizado es la plata, más costoso que el aluminio pero con una mejor reflectancia, incluso en el infrarrojo lejano, aunque posee una reflectancia inferior al 90% entre las regiones del azul y el ultravioleta.

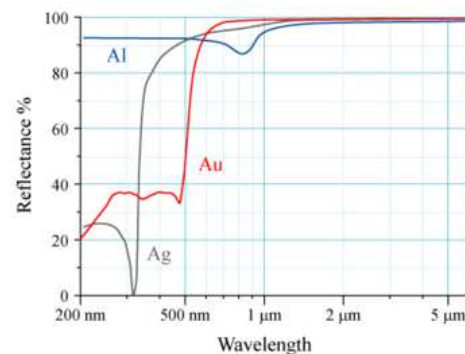


Fig. 3 Reflectancia en función de la longitud de onda de la plata (Ag), oro (Au) y Aluminio (Al).

Un material también utilizado, más costoso aún que la plata es el oro, con reflectancia entre 98%-99% a lo largo del infrarrojo, pero con reflectancia limitada por debajo de los 550 nm, resultando el color dorado típico.

En la figura 3 puede verse un gráfico con la reflectancia de tres materiales descritos anteriormente en función de la longitud de onda.

V. EFICIENCIA ÓPTICA

La eficiencia de una red de difracción de conmutadores, depende de tres factores fundamentales. 1) Eficiencia de difracción. 2) La relación de apertura (La relación de apertura entre el ancho de la cinta y el ancho del espacio vacío) y 3) La reflectividad de la capa superior, dependiendo del material elegido. En un red de difracción ideal, el 81 % de la energía difractada es dirigida en el +/- 1er orden. El espacio entre las cintas de la red degrada la eficiencia, de manera no lineal. La reflectividad de la capa superior depende del material elegido.

La eficiencia del dispositivo, es el producto de la eficiencia de difracción (típicamente del 81%), La relación de apertura (típicamente >95%), y la reflectividad de la capa superior (consideraremos >91%). La eficiencia total es de alrededor del 70%, correspondiente a una pérdida de inserción de aproximadamente 1,5 dB.

La tabla "1" es un ejemplo de cómo influye la relación entre el ancho de la superficie del conmutador, y el espaciado que existe entre ellos en la red. El ejemplo es para una red de conmutadores de ancho 3µm. (Como puede observarse, el espaciado entre conmutadores degrada la eficiencia en forma no lineal).

Ribbon gap (µm)	1.2	1.0	0.8	0.6	0.5	.35
Ribbon/gap efficiency (%)	82	87	92	95	97	98

Tabla 1. Ancho de gap vs. eficiencia óptica.

La eficiencia de difracción de la rejilla, no puede superar el valor teórico del 81%, que es la intensidad máxima que puede difractar en el primer orden de difracción en la función de la intensidad de la onda incidente.

Si consideramos una onda normal a la superficie de la red de difracción, es posible describir la eficiencia en función de la diferencia de alturas entre cintas consecutivas. La ecuación que la describe es la siguiente:

$$I = \frac{I_0}{2} \text{sinc}^2\left(\frac{\pi}{2}\right) \left[1 - \cos\left\{ \frac{2\pi d}{\lambda} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{1 - (\lambda/p)^2}} \right) \right\} \right] \quad (4)$$

Donde I_0 es la intensidad de la onda incidente, d es la diferencia de altura entre cintas consecutivas, y p es el periodo de la red. La intensidad máxima se logra para una profundidad

de la rejilla de $\frac{1}{4}$ de la longitud de onda incidente; en ese caso se consigue la interferencia máxima posible, y por consiguiente la mayor intensidad difractada en el orden ± 1 .

VI. SIMULACION DE UNA RED DE DIFRACCION

A continuación se mostrarán los resultados de una simulación para una red de difracción simple, con tres cintas activas, y uno de sus electrodos común.

Utilizando oro como material de recubrimiento, se hace un barrido de 0 a 100 (V) de tensión aplicada en los extremos.

En la tabla 2 se muestran las dimensiones utilizadas para la red de difracción.

Ancho de la cinta	1,5e-6 [m]
Largo de la cinta	18e-6 [m]
Periodo	3e-6 [m]
Espesor del revestimiento de oro	40e-9 [m]
Ancho del gap	1e-9 [m]

Tabla 2. Parámetros geométricos de la cinta

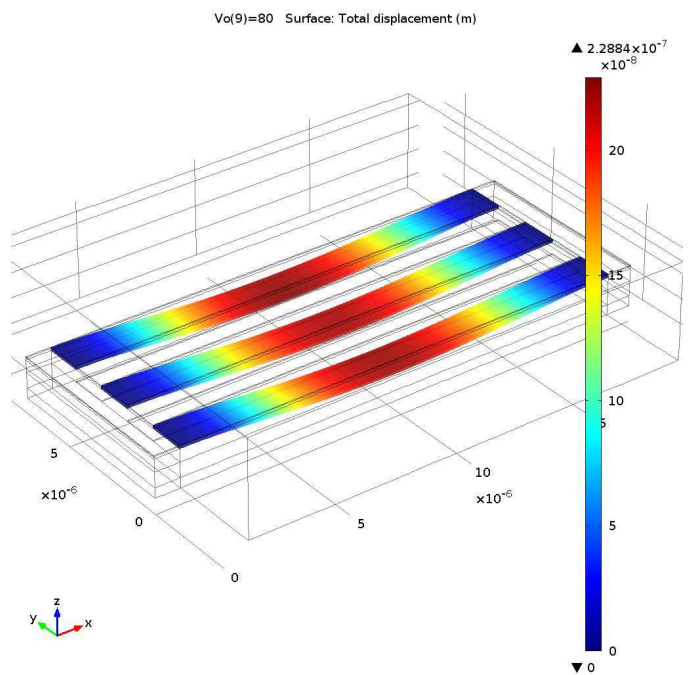


Fig. 4 Red de difracción: se muestra en color las cintas activa de la red. El color rojo es donde se produce el mayor desplazamiento y el azul donde no lo hay.

Como muestra la tabla "1" el ancho de la cinta es de 1.5µm lo que resulta en un periodo espacial de la red de 3µm. Si consideramos incidencia perpendicular en nuestra red y además descartamos los órdenes de difracción superiores a 1 para la ecuación "1" tenemos la ecuación (5).

$$\lambda/p = \sin(\beta) \quad (5)$$

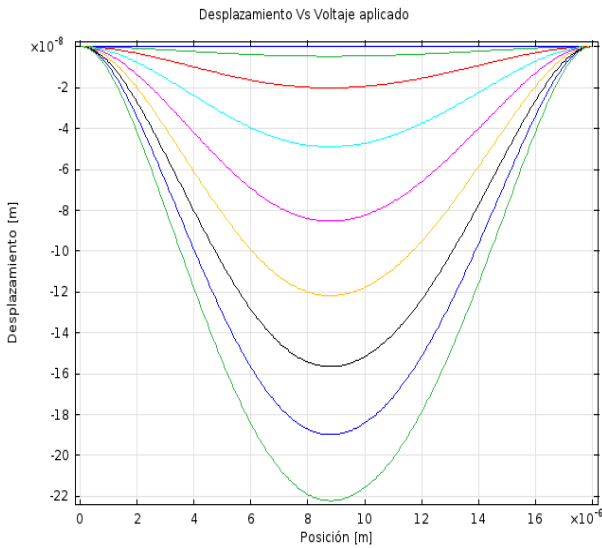


Fig. 5 Puede verse como la parte central de la cinta es sufre un mayor desplazamiento por acción de la fuerza electrostática. Las curvas comprenden tensiones desde 0 a 80 (V) con saltos de 10 (V) entre curvas.

Se puede observar que nuestra red solo difracta las longitudes de onda por debajo de los 3µm, además por la elección de nuestro material reflectante nos conviene trabajar con longitudes de onda superiores a los 550nm. De esta forma vemos que la red está diseñada para trabajar con longitudes de onda entre los 550nm y los 3µm.

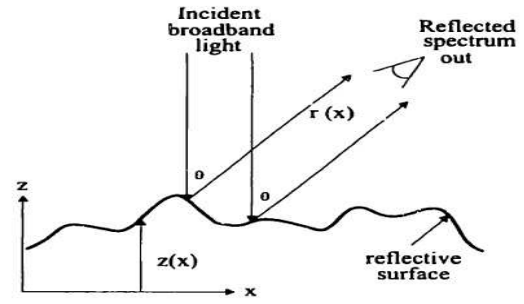
Por otra parte, sabemos que el mejor rendimiento se alcanza cuando el desplazamiento de las cintas es de λ/4, en la figura 5 vemos que la máxima deflexión de las cintas es de 220nm para la máxima tensión aplicada. Esto le pone otro límite superior en cuanto a la uso del espectro, ya que será más eficiente para longitudes de onda inferiores a 4*220nm (880nm).

Concluimos que la red de difracción es apta para trabajar con longitudes de onda entre 550nm y 880nm.

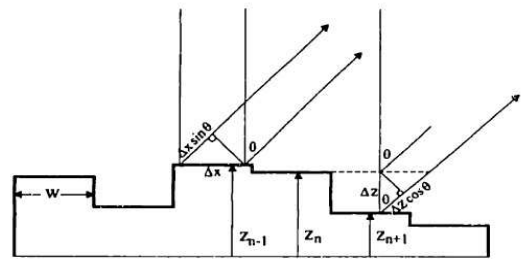
VII. FILTROS ÓPTICOS

Emularemos una red de difracción ideal de 1 dimensión, como muestra la figura, mediante la siguiente aproximación. Supongamos que tenemos N superficies espejadas de ancho w, a lo largo de un sustrato plano, y de alturas Z1,Z2,...,Zn con respecto al sustrato.

Las alturas Z1,Z2,...,Zn son electroestáticamente posicionadas. Ya que las alturas de las superficies, modifican el camino óptico de la luz reflejada, de esta forma se cambia el la función de transferencia de la red de difracción.



6-a



6-b

Fig. 6 Red de difracción ideal con superficie continua (6-a). Red de difracción con alturas discretas (6-b) que aproxima la red ideal.

Primero considerando una red ideal de 1 dimensión, como la mostrada en la fig. 6-a, con alturas z(x), donde x es la distancia a lo largo de la red de difracción. El espectro del policromador puede ser modelado con la aproximación de Franhoufer, de la integral de difracción de Fresnel-Kirchhoff:

$$E_{\theta}(\lambda) = \frac{C}{\lambda} \int e^{j\frac{2\pi}{\lambda}r_{\theta}(x)} dx \tag{6}$$

Donde $E_{\theta}(\lambda)$ representa el campo lejano reflejado un ángulo θ , λ es la longitud de onda reflejada, C es una constante independiente de λ , y $r(x)$ mide el camino relativo de la onda reflejada a cada punto, a lo largo de la red de difracción.

De la fig. 6-a, para cada longitud λ incidente, el camino relativo del campo lejano, esta dado por:

$$r_{\theta}(x) = r_0(0) - x \sin \theta - z(x)(1 + \cos \theta) \tag{7}$$

Sustituyendo $r_{\theta}(x)$ en la ecuación anterior, tenemos:

$$E_{\theta}(\lambda) = \frac{C_1}{\lambda} \int e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}[x \sin \theta + z(x)(1 + \cos \theta)]} dx \tag{8}$$

Para la constante C1 independiente de λ . Esta ecuación se puede reescribir como:

$$E_{\theta}(u, \lambda) = \frac{C_1}{\lambda} \int e^{-j\phi_{\lambda}(x)} e^{-2\pi j u x} dx \tag{9}$$

Donde $\phi_\lambda(x) = \frac{2\pi}{\lambda} z(x)(1 + \cos\theta)$, y $u = \frac{\sin\theta}{\lambda}$. La ecuación anterior tiene la forma de la Transformada de Fourier de $e^{-j\phi_\lambda(x)}$ donde u es la variable de la transformada. Sin embargo $\phi_\lambda(x)$ depende de λ , y esta no es independiente de u , entonces las técnicas de la transformada de Fourier no son directamente aplicables.

Ahora asumimos que el perfil de la red de difracción consiste en N superficies planas de ancho w , pegadas unas con otras, de altura Z_1, Z_2, \dots, Z_N con respecto al substrato (fig. 6b), con $0 \leq x \leq N \cdot w$. Sustituyendo $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ en la ecuación (9), y usando $z(x)$ con N saltos de altura tenemos:

$$E_\theta(k) = C_2 k \sum_{n=1}^N (e^{-jkz_n(1+\cos\theta)} \int_{(n-1)w}^{nw} e^{-jkx \sin\theta} dx)$$

$$= C_3 k e^{\frac{1}{2}jkw \sin\theta} \frac{\sin(\frac{1}{2}kw \sin\theta)}{kw \sin\theta} \sum_{n=1}^N e^{-jkz_n(1+\cos\theta)} e^{-jknw \sin\theta} \quad (10)$$

Donde C_2 y C_3 son independientes de k y θ .

De esta forma podemos resolver numéricamente el ángulo de difracción para cada longitud de onda, dada una cierta configuración de la red de difracción.

Se destaca que lo que interesa es la intensidad espectral ($I_\theta(k)$), que no es otra cosa que el cuadrado del valor absoluto de la función del campo lejano $E_\theta(k)$.

En la fig. 7 se muestra la intensidad espectral normalizada $|E_\theta(k)|^2$ de un haz de banda ancha después de difractar en una red de difracción de las dimensiones que indica la tabla "2", pero con 15 cintas en paralelo. El cálculo de $|E_\theta(k)|^2$ se realiza según la ecuación (10) con un software de cálculo. La profundidad de las cintas esta optimizada para lograr mayor eficiencia en longitudes de onda de 760nm.

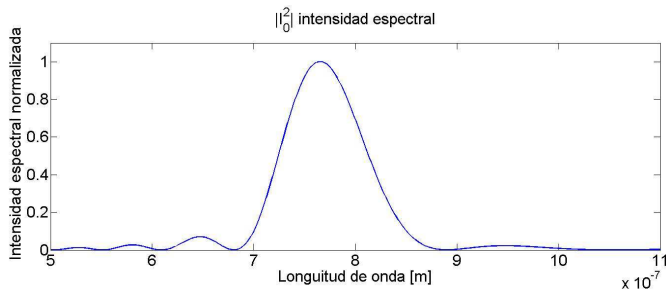


Fig. 7 Intensidad espectral normalizada para un ángulo de salida de 14 grados de una red de difracción periódica de 15 cintas, los parámetros de la red están dados por la tabla "2". Podemos ver que la máxima intensidad se da para una longitud de onda de 760nm.

La resolución del problema inverso es aún de mayor utilidad, es decir, dada una determinada transferencia óptica, es posible hallar una configuración de la red de difracción que permita aproximar la transferencia buscada.

Esto se hace mediante un mecanismo iterativo que permita ir ajustando las alturas de las cintas e ir comparando la transferencia resultante con la transferencia buscada hasta alcanzar un resultado satisfactorio.

VIII. APLICACIONES

A. Píxeles con GLV (Grating Light Valves)

El GLV es una red de difracción MEMS periódica, está compuesta por 6 cintas reflectantes, de las cuales solo 3 de ellas son capaces de deflectar y las otras 3 son fijas. Están diseñados para trabajar en el espectro visible.

Es posible hacer un píxel con la combinación de 3 dispositivos GLV, cada dispositivo es diseñado para trabajar en una zona particular del espectro visible, actuarán en la zona del rojo, el verde y el azul respectivamente.

Cuando el haz de luz incide sobre cada de los dispositivos es difractado en una dirección en particular, dependiendo de la periodicidad espacial de la red. Al mismo tiempo podemos regular la intensidad de luz difractada en el orden 1, variando la tensión aplicada entre los electrodos. Sabemos que la máxima intensidad se da para la profundidad $\lambda/4$.

De esta forma se tiene el control intensidad de luz RGB que llega al píxel y podemos determinar la el color deseado con la combinación de los 3 colores.

B. Policromador

Un policromador es una red de difracción MEMS, capaz de deflectar cada cinta individualmente (fig. 8), permitiendo la realización de muchas transferencias ópticas con buena aproximación.

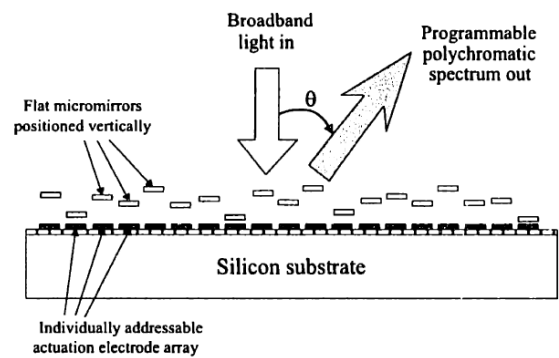


Fig. 8 Policromador MEMS donde ingresa un haz de banda ancha y sale en la dirección θ solo una parte del espectro, seleccionado por la posición relativa de las cintas.

Una de sus principales aplicaciones es la detección de elementos gaseosos. Se basa en la propiedad de los gases de absorber ciertas franjas del espectro infrarrojo.

Un haz infrarrojo incide sobre una muestra gaseosa desconocida G1, la atraviesa e incide con el policromador. Este se encuentra conmutando continuamente entre dos

estados posibles, previamente configurados. El primer estado corresponde a la transferencia que permite solo la banda de paso de un gas G2. El segundo estado es tal que el área bajo la curva de transferencia sea igual que la primera pero no que no se superponga.

A la salida del policromador hay un detector, que convierte la intensidad de luz en una tensión. Si el gas G1 es distinto de G2, se medirá una tensión V_0 en el detector.

Cuando el gas $G1=G1$ entonces el valor de tensión medido por el detector disminuye ya que parte de la intensidad de luz está siendo absorbida.

IX. CONCLUSIONES

Con el desarrollo de la tecnología MEMS y en particular con las redes de difracción de conmutadores, se abre un gran abanico de posibilidades de aplicaciones. Las que se mencionan en este trabajo son solo algunas entre muchas otras.

Las modernas herramientas informáticas permiten explorar estas posibilidades y determinan un amplio uso de las nuevas tecnologías.

Referencias

- [1] Method and apparatus for modulating a light beam, David M. Bloom, Francisco S. A. Sandejas, Olav Salgaard. (Mayo 1994).
- [2] Grating Light Valve Technology: Update and Novel Applications, D. T. Amm, R. W. Corrigan, Silicon Light Machines, Sunnyvale, CA. (1998).
- [3] MEMS for Optical Functionality, S.-G. Kim, G. Barbastathis and H. L. Tuller. (2004).
- [4] Micro Machined Non-Linear Wavelength Filters for Image Acquisition, S. Perumal Sankar, Dr.S. Sundaravadelu. (Enero 2007).
- [5] Grating light valves for high resolution displays, RAJB. APTE. (Junio 1994).
- [6] The polychromator: A programmable MEMS diffraction grating for synthetic spectra, G.B. Hocker, D. Youngner, M. Butler, M. Sinclair, T. Plowman, E. Deutsch, A. Volpicelli, S. Senturin, A. J. Ricco. (Junio 2000).
- [7] Positioning, Control, and Dynamics of Electrostatic Actuators for Use in Optical and RF Systems, Elmer S. Hung. (Diciembre 1998).