

## CAPITULO 2

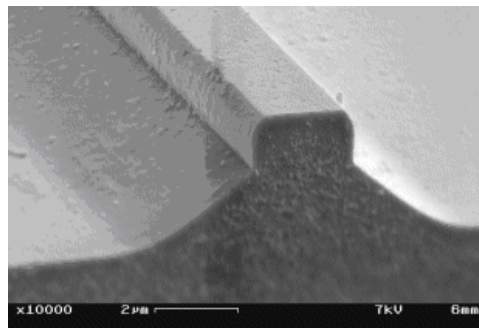
### ANTECEDENTES

La teoría de Maxwell del campo magnético y eléctrico y su idea de que la luz es una onda electromagnética fueron algunas de las grandes bases para la comunidad científica, además de unificar el entendimiento de una diversidad de fenómenos. La aparición de fenómenos como el efecto fotoeléctrico que no podían ser explicados por medio de la teoría ondulatoria, sino sólo reviviendo la idea de la naturaleza corpuscular de la luz, dio como resultado el surgimiento de la Teoría Cuántica moderna. Los efectos de este desarrollo dieron como resultado que la ciencia óptica progresara y en éste contexto la amplitud del campo electromagnético parecía ser de importancia menor en los procesos ópticos.

Una vez hechas las reformas necesarias fenómenos tales como la doble refracción en materiales isotrópicos y el efecto Raman (en el cual la onda dispersa por el material tiene una frecuencia que puede ser la suma o diferencia de la frecuencia del campo aplicado y la frecuencia natural del medio) no pudieron ser explicados por la Óptica lineal. Esto provocó la sospecha de que la intensidad si era fundamental en los procesos ópticos.

Los fenómenos no lineales siempre han estado presentes, pero estaban ocultos debido a las relativamente bajas intensidades que ocurrían en el entorno ( $10^{-1} \text{ W cm}^{-2}$ ) o aquellas que podrían ser obtenidas en un laboratorio. El descubrimiento del láser en 1960 generó un progreso en la obtención de radiaciones, lo condujo a que actualmente sea posible producir radiaciones altamente coherentes y enfocables. Un valor típico de intensidad local extremadamente alta obtenido en laboratorio es  $10^{18} \text{ W cm}^{-2}$  [8].

La juventud relativa en estudios sobre cómo la luz de altas intensidades interactúa y se propaga a lo largo de la materia en la óptica no lineal, la ha convertido en un área científicamente fértil y tecnológicamente prometedora. Fabricaciones de láseres, vías de comunicación, componentes computacionales, almacenamiento de imágenes, emisiones altamente limpias, etc., así las múltiples aplicaciones para la óptica no lineal van en aumento. Adicionalmente a esto podemos mencionar la existencia de técnicas modernas de simulación computacional como parte del arsenal de herramientas matemáticas en la solución de esta clase de problemas, que al conjugarse con las teorías, la intuición física y sobre todo la parte experimental se convierten en el impulso que moverá el desarrollo científico.



**Fig. 2. 1.** Guía de onda.

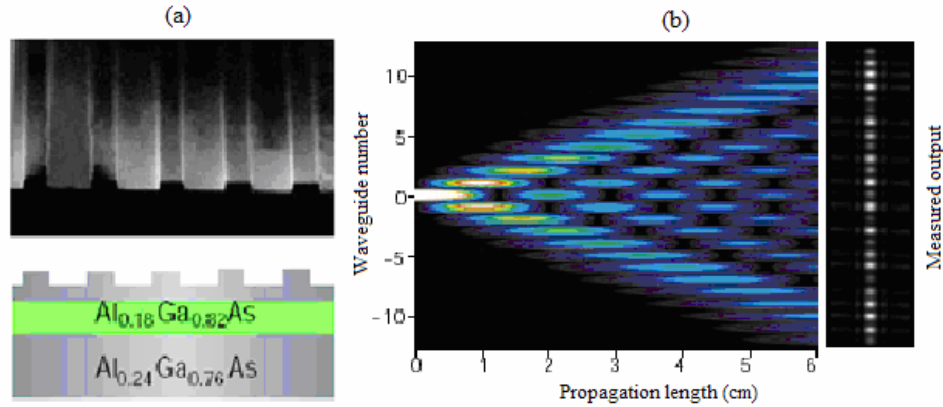
La óptica no lineal probablemente revolucionará las telecomunicaciones y tecnologías computacionales del futuro. Partiendo de que la distancia de interacción de las guías de onda y fibras ópticas es relativamente larga, y que por el contrario sus áreas transversales son diminutas, las han convertido en medios eficientes para el transporte de trenes de haces luminosos en forma de solitones [8].

Como posibles beneficios se encuentran la disminución e incluso la eliminación de sistemas repetidores y amplificadores. Dado que la interacción de diferentes haces en el vacío es nula, es decir, solo interactúan dentro de la materia, se tiene paralelismo (realizar diferentes procesos al mismo tiempo).

Los avances de la Óptica no lineal en el estudio de fenómenos presentes en los arreglos de guías de onda han sido grandes. Dentro de los comportamientos más importantes mostrados por esta clase de sistemas se puede mencionar la difracción discreta, el auto-confinamiento, el auto-desenfocamiento, disminución de la difracción y formación de solitones discretos, entre otros.

Las propiedades de difracción discreta en arreglos de guías de onda unidimensionales fueron primero tratadas teóricamente en 1965 [17] y experimentalmente observadas en arreglos de guías formadas por Arseniuro de Galio (GaAs) unos años más tarde [18]. Sin embargo, en ese tiempo no era claro como se podría obtener una ventaja mediante la supresión de este proceso, por esta razón el trabajo permaneció inactivo por largo tiempo [7]. Fue hasta los años 80's cuando Haus y sus colaboradores revivieron este campo mostrando experimentalmente algunas propiedades de los arreglos de guías de onda [19].

Tiempo después, fue sugerida la posibilidad de que en arreglos de guías de onda no lineales la luz podría ser auto-atrapada. Christodoulides y Joseph predijeron la existencia de ondas solitarias (solitones) en arreglos no lineales [20], iniciándose así un intenso estudio en el campo. Recientes avances en las tecnologías de micro-fabricación han permitido la elaboración con gran precisión de esta clase de arreglos [7]. Una muestra de arreglos de guías de onda se presenta en la Fig. 2.2a.



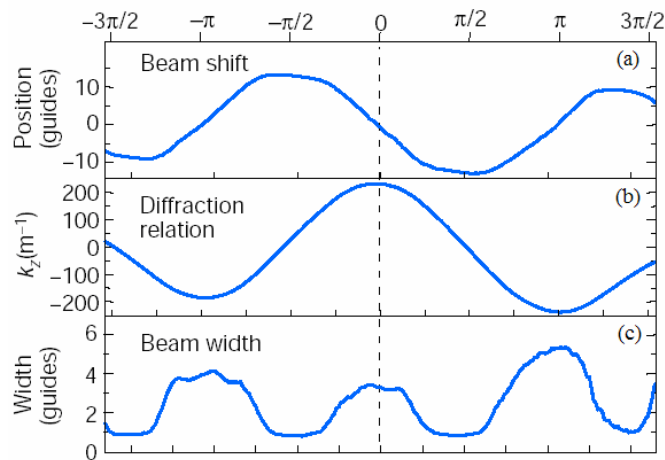
**Fig. 2. 2.** (a) Arreglo de Arseniuro de Galio Aluminio (AlGaAs). (b) Difracción discreta [7].

Una consecuencia de la discretización del material es la difracción de la luz dentro del mismo. Esta difracción es causada por el traslape de los modos de propagación de cada una de las guías, debido al tunelamiento óptico. Recientes estudios muestran el comportamiento de la luz dentro del arreglo, el cual no puede ser observado realmente solo mediante simulaciones numéricas. Un ejemplo de simulación numérica se presenta en la Fig. 2.2b, donde un haz de baja intensidad y longitud de onda de  $1.56 \mu\text{m}$  excita un solo canal en un arreglo con separación entre guías de  $15 \mu\text{m}$  [7]. La luz se distribuye en forma discreta concentrando la mayor parte en dos lóbulos en los extremos de la muestra. Es evidente una gran diferencia con el caso continuo en donde la mayoría de la luz se concentra alrededor del centro, así que la difracción presentada por esta clase de sistemas difiere ampliamente de su contraparte continua.

La difracción es un efecto geométrico y depende solamente del índice de refracción del medio en donde la luz se propaga, incluso existe en el vacío debido a éste origen [4]. En un medio continuo el ángulo de difracción de un haz es inversamente proporcional al índice

de refracción lineal del mismo, de esta forma aumentando el índice de refracción en el material es posible disminuir la difracción provocada. Sin embargo, existe un límite para este índice de refracción, además de que la difracción solo disminuye y no es posible suprimirla. Por otra parte, la difracción no depende del ángulo de inclinación del haz y siempre tiene un valor negativo [4]. Investigaciones teóricas [20] y experimentales [4,10] muestran que en arreglos de guías de onda la relación de difracción es de tipo cosenoidal, lo que otorga amplias posibilidades, como por ejemplo su anulación, Fig. 2.3b.

Para llevar a cabo observaciones experimentales la luz es detectada por una cámara en la salida porque no es posible su observación a lo largo de la propagación [10].

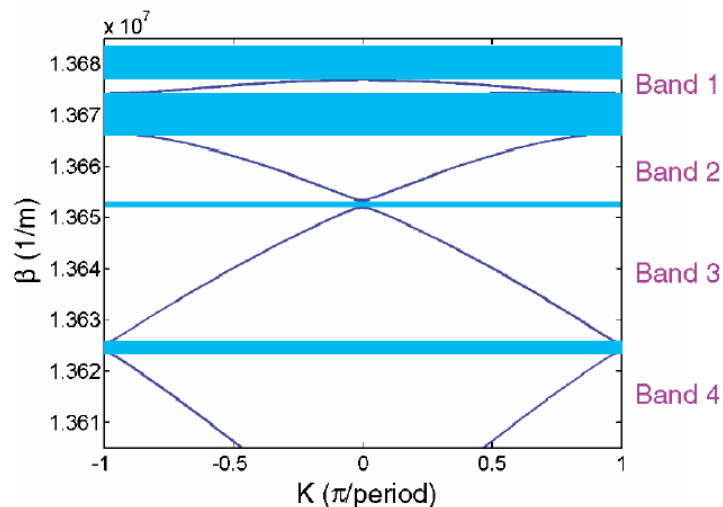


**Fig. 2. 3.** (a) Desplazamiento del centro del haz con respecto al haz de entrada. (b) Relación de difracción para un arreglo de guías de onda. (c) Ancho del haz de salida [7].

Otro efecto de gran interés es el auto-confinamiento, el cual da como resultado la aparición de solitones. Un solitón es un paquete de onda que no cambia su perfil ni velocidad a lo largo de la propagación. En el caso de arreglos de guías de onda se genera

una variante de éstos denominados *solitones discretos (SD)*. La primera evidencia experimental de SD fue obtenida exitosamente a finales de 1990 [9]. El auto-confinamiento de la luz en forma de SD surge como consecuencia de la compensación total entre la no linealidad de las guías y la difracción discreta provocada por efectos lineales de acoplamiento entre canales adyacentes. En consecuencia, el campo es concentrado en un cierto número de guías, dando como resultado la aparición de un SD [7].

Dependiendo del tipo de la no linealidad del medio, diferentes familias de solitones pueden ser generados. Investigaciones hacen uso de arreglos formados por materiales que presentan no linealidades tipo Kerr [9], cuadráticas o fotorefractivas [21] en la generación de solitones. Para un cierto material la no lineal puede experimentar dos relaciones entre la intensidad y el índice de refracción. Auto-enfocamiento (el índice de refracción crece localmente con la intensidad) o desenfocamiento (el índice de refracción disminuye con la intensidad) [7].



**Fig. 2. 4.** Estructura de bandas prohibidas y permitidas de un arreglo típico de guías de ondas, donde  $\beta$  es graficada como función del número de onda Bloch ( $k_x=K$ ) [11].

Los SD's usualmente son analizados con el marco de la teoría de modos acoplados, usando la ecuación discreta no lineal de Schrödinger [20]. En éste marco el modo del arreglo (un "supermodo") esta definido como una excitación colectiva de cada uno de los modos de las guías acopladas, es decir, el supermodo esta determinado por modos individuales con amplitudes complejas [11].

El estudio más general se hace con base en el análisis Foquet-Bloch (FB). Así se determina un espectro de la constante de propagación en  $z$  ( $\beta=k_z$ ) y su componente en  $x$  ( $k_x$ ) en una serie de bandas permitidas, distanciadas por bandas prohibidas, como lo muestra la Fig. 2.4.

Desde el punto de la óptica una banda prohibida (gap) se refiere a un cierto valor del vector de onda para el cual no existe transmisión. Para poder explicar con mayor claridad supongamos una red atómica y tomemos dos planos de átomos adyacentes y separados una cierta distancia  $d$ . Adicionalmente, se tiene un frente de onda que incide sobre la red con un cierto ángulo de inclinación  $\theta$ . Los ángulos para los que se cumple la relación  $2d \sin \theta = m\lambda$ , donde  $m$  es un número entero y  $\lambda$  es la longitud de la onda incidente, son aquellos en donde se encuentra interferencia constructiva de las ondas reflejadas por los planos de átomos. Así que sí la interferencia es constructiva la onda se refleja y no existe transmisión de energía en el medio. Adicionalmente a esto, cuando el material pierde geometría, por ejemplo en un arreglo de guías de onda, la ley de difracción presentada anteriormente varia [10]. De este modo, en términos ópticos se obtiene una serie de valores para el ángulo en los cuales existe transmisión en el material.

El análisis de modos acoplados solo describe la primera banda de este diagrama y en la gran mayoría de los experimentos hechos actualmente se hace la excitación de la misma.

Se ha extendido el análisis de modos acoplados para describir la segunda banda, aunque diferentes aproximaciones deben ser consideradas. Se han investigado la propagación lineal y no lineal de la luz excitando varias bandas de mayor orden [11].

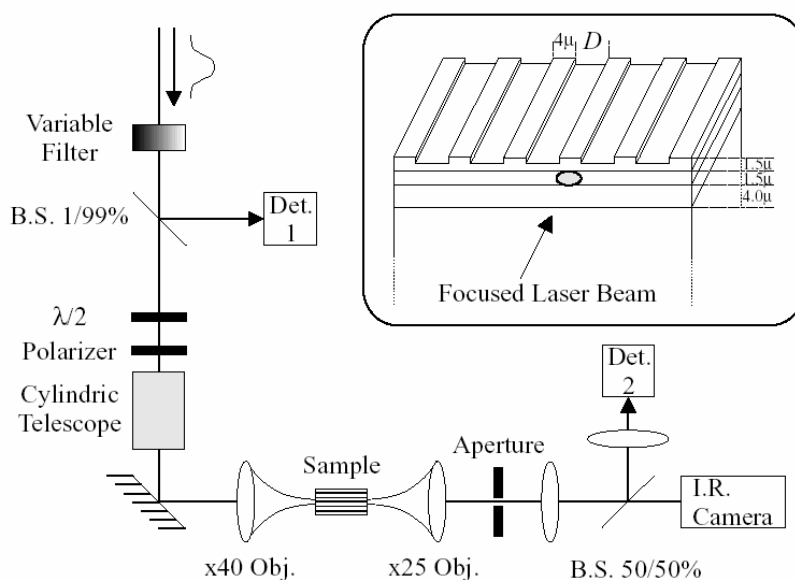
En el caso lineal, el campo óptico que viaja a través del arreglo está sometido a un potencial periódico [7], lo que da lugar a la relación de dispersión entre  $\beta$  y  $k_x$  mostrada en la Fig. 2.4. Por lo tanto, las únicas ondas que pueden desplazarse en la dirección  $x$  son aquellas cuyos eigenvalores en  $\beta$  caen dentro de una banda permitida. Aquellas funciones de onda que posean valores dentro de las bandas prohibidas decaerán exponencialmente a lo largo de la dirección transversal.

Recientes experimentos [12] han demostrado la aparición de nuevas brechas (Rowland ghost gap) en el diagrama anterior. Esto se logra tomando un arreglo de guías de onda con grosores alternantes lo que aumenta una modulación transversal en el índice de refracción. Obteniendo comportamientos diferentes en la propagación y la generación de SD. También, se ha sugerido la posibilidad de variar las propiedades de los solitones discretos por medio de una modulación periódica de las guías de onda a lo largo de la dirección de propagación.

Ahora bien, la aparición de un SD surge como resultado de la no linealidad de cada guía. Bajo las condiciones no lineales, el campo eléctrico de la onda perturba el índice de refracción, introduciendo un defecto en la red inicialmente perfecta. Consecuentemente, los eigenvalores de este defecto se mueven dentro de la banda prohibida y su función de onda decae rápidamente lejos de la región perturbada. Por lo tanto, el campo se localiza a sí mismo y un SD se forma. Conforme la energía del campo óptico aumenta, su eigenvalor de propagación se mueve más adentro de la brecha, dando lugar a un mayormente confinado y transversalmente inmóvil SD [7].



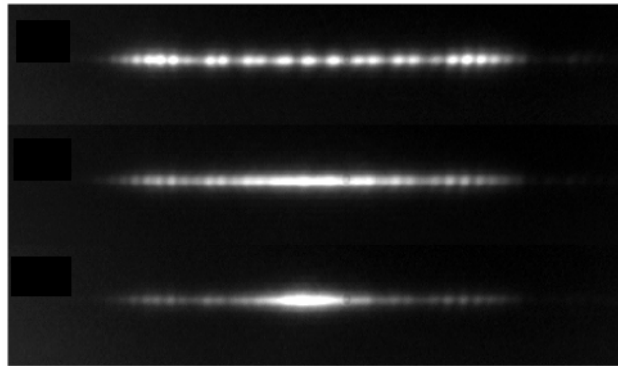
Las pequeñas dimensiones son una característica fundamental en esta clase de arreglos. Típicamente las guías de onda miden alrededor de  $4\ \mu\text{m}$  y la separación entre ellas es de aproximadamente  $7\ \mu\text{m}$  [9]. Así pues, un arreglo de 50 guías de onda tiene un grosor de aproximado de  $543\ \mu\text{m}$ . Para llevar a cabo la excitación real de un arreglo con estas dimensiones se necesita de configuraciones experimentales muy sofisticadas, como lo muestra la Fig. 2.5.



**Fig. 2. 5.** (a) Configuración experimental. (b) Dimensiones típicas en la fabricación de un arreglo unidimensional. La muestra consiste en un núcleo de  $\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}$  y una capa de  $\text{Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}$  crecida sobre un sustrato de GaAs [9].

En la disposición experimental mostrada, la luz inyectada es controlada por un filtro variable y medida por un detector, el cual definirá la distribución de entrada. La polarización es regulada por un plato de media onda y un polarizador. El haz es reformado por un telescopio cilíndrico en forma oval con el fin de hacerla corresponder con el modo

de la guía. La luz se acopla con la muestra por medio de un objetivo  $\times 40$  y colectada por un objetivo  $\times 25$  a la salida. La muestra se coloca sobre un piezoeléctrico con variación  $xyz$ , para corregir la alineación de la misma. La señal de salida es tomada con una cámara infrarroja como lo muestra la Fig. 2.6. La mitad de la potencia es enfocada dentro de un detector de salida con la finalidad de definir su perfil.



**Fig. 2. 6.** Imágenes de las intensidades de salida para diferentes potencias [9].

El estudio de sistemas discretos de este tipo se ha extendido a dos y tres dimensiones, en los cuales la aparición de SD's no es la excepción dentro de los fenómenos presentes, mostrando propiedades que solo en dimensiones mayores pueden ocurrir. Los fenómenos presentes en esta clase de sistemas son aún mayores y sus aplicaciones están dirigidas en su mayor parte a sistemas de comunicación y dirección de señales. Obviamente para dimensiones mayores la simulación y estudio son de mayor complejidad.