

La Física detrás de un láser

Dr. José Luis Lucio Martínez¹, Isael Aaron Segoviano Caudillo¹, Andrea Alejandra Aguilar Mayorga¹, Jesús Eliseo Vázquez Monzón¹, Estefanía Alejandra Hernández Rangel¹, Juan Carlos Pérez Ramírez¹, Oscar Manuel Mendoza Rosas¹

¹Universidad de Guanajuato, División de Ciencias e Ingenierías.

jllucio@ugto.mx¹, iasegovianocaudillo@ugto.mx¹, aa.aguilarmayorga@ugto.mx¹, je.vazquezmonzon@ugto.mx¹, ea.hernandezrangel@ugto.mx¹, jc.perezramirez@ugto.mx¹, Om.mendozarosas@ugto.mx¹

Resumen

Se hace un análisis del funcionamiento de un láser, desde la perspectiva de la mecánica cuántica hasta la óptica. Se realiza la cuantización del campo electromagnético y un análisis de cuál es el estado correspondiente al haz de luz cuya característica fundamental sea la del láser, la coherencia. Se analiza el átomo y sus niveles de energía, prestando atención a la forma en la que se realizan las transiciones entre niveles energéticos, la emisión inducida por radiación y como esta interactúa con la materia. Se explica lo que es la inversión de población y cómo se usa en la emisión estimulada para generar un láser. Finalmente se explica la estructura y las características de la fibra óptica y el comportamiento del láser en ella.

Palabras clave: Láser; Óptica; Mecánica Cuántica; Cuantización; Electromagnetismo; Fotón; Coherencia; Estados coherentes; Emisión; Emisión estimulada; Absorción; Inversión de población; Fibra óptica.

Introducción

A principios del siglo XIX, el científico Thomas Young hizo un experimento relevante para la física el cual a la fecha lleva el nombre del experimento de la doble rendija, en el que se descubrieron los fenómenos de interferencia de la luz, sugiriendo entonces su característica ondulatoria.

Sin embargo, con la revolución que trajeron las ideas del científico Max Planck sobre la cuantización de la energía, se llegó a la conclusión de que el campo electromagnético se podía comportar tanto de forma corpuscular como ondulatoria. Para 1968 se desarrolló más a detalle la teoría sobre los estados coherentes y se les conoció como tal, gracias a Glauber, quien se encontraba trabajando con haces de luz incoherente.

Al tener varias ondas superpuestas se produce una interferencia entre ellas, la forma que se tiene para analizar la interferencia entre ellas es por medio de la coherencia, que se mide observando la relación de las fases entre dos puntos distintos en una onda y ver cómo cambian en el espacio y en el tiempo. Debido a lo anterior se definen dos tipos de coherencia: la espacial y la temporal. La coherencia espacial es cuando se mantiene constante la fase en diferentes puntos del espacio. La coherencia temporal en cambio es la relación entre las fases que pasan por un punto dado del espacio, pero en diferentes tiempos, por lo que este tipo de coherencia ayuda a analizar qué tan monocromático es un haz de luz, debido al cambio en las longitudes de onda.

Enfatizando entonces el que las ecuaciones de Maxwell describen al campo electromagnético, haciendo algo de álgebra se puede cuantizar el campo; de modo que teniendo un Hamiltoniano se pueden calcular los autoestados gracias a la ecuación de Schrödinger. En el presente documento veremos una forma particular de tratar este problema.

En 1960 se logró obtener experimentalmente la primer fuente de luz coherente de alta potencia que hoy conocemos como "L.A.S.E.R." ("Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation", es decir, Amplificación de Luz por emisión estimulada de radiación). Actualmente un elemento que ha sido parte fundamental para la construcción de estas fuentes de luz coherente es la fibra óptica, cuyo estudio permitió la transmisión de datos a largas distancias.

A pesar de la gran relevancia que tiene hoy en nuestras vidas dicha tecnología, sin la cual las telecomunicaciones serían imposibles como las conocemos hoy en día, el proceso de comprensión de la luz y la manera de emplear ese conocimiento fue largo, y se necesitaron contribuciones de diversos científicos, entre ellos Young, Einstein, Newton, Planck, etc. para lograrlo.

En este trabajo, se analizarán algunas ideas fundamentales para la comprensión del principio de funcionamiento de un láser, así como las herramientas teóricas (mecánica cuántica) y experimentales (fibra óptica) que han permitido evolucionar en el manejo y creación de los láseres para poder ampliar la cantidad de aplicaciones que se le dan para simplificar la vida cotidiana y en áreas de investigación.

Cuantización del campo electromagnético

La descripción de la naturaleza de la luz no ha sido en absoluto tema trivial a lo largo de la historia. Se han defendido posturas que podrían pensarse contradictorias, pues por ejemplo, el patrón de interferencia generado en el experimento de las rejillas de Young nos puede llevar a afirmar que la luz es una onda electromagnética, más el efecto fotoeléctrico, por poner otro ejemplo, nos hace poner en tela de juicio lo anterior y defender más bien el planteamiento de Einstein que evaluaba la luz como un torrente de “cuantos” de energía, de manera similar a como Newton había hecho al considerar la luz como un conjunto de “corpúsculos”.

En el presente texto haremos uso de un concepto coloquialmente llamado “la dualidad onda-partícula”, que en esencia hace referencia al cambio de perspectiva que necesitamos tener para hacer descripciones de la realidad al entrar en la escala en que los efectos cuánticos tienen relevancia.

Esto es, si bien consideramos que la luz visible es en efecto una sección del espectro electromagnético, el cual está conformado por ondas, también hemos de considerar sus propiedades como “cuanto” o partícula (como bosón); el detalle está en tener en cuenta que ambas descripciones no son mutuamente excluyentes, sino que ambas son válidas dado que la luz posee propiedades que relacionan un concepto con el otro.

Por ejemplo, toda onda tiene, entre otras características intrínsecas, una longitud específica, (la luz visible se distingue de hecho por tener longitudes de onda entre los 400 y 700 nm, aproximadamente), y sabemos que la longitud de una onda (λ) tiene una relación de proporcionalidad inversa con la frecuencia (f) :

$$\lambda = v/f \quad (1)$$

Donde v es la velocidad de fase de la onda en el medio de propagación. En el caso de considerar la velocidad máxima, tendríamos que sustituir v por c , la velocidad de la luz en el vacío, con $c = 2.997 \times 10^8 \text{ m/s} \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$

Sin embargo, la frecuencia es también una propiedad característica de todo “cuanto” de luz (“fotón”, de ahora en adelante), de modo que podemos establecer una conexión clara entre ambas descripciones al hablar de la energía de cada fotón, dada por:

$$E = hf \quad (2)$$

O, análogamente si se desea trabajar con la frecuencia angular:

$$E = \hbar\omega \quad (3)$$

Siendo la constante de Planck $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ Js}$ y $\hbar = \frac{h}{2\pi}$

Usando el tratamiento convencional en óptica cuántica [1] que será descrito con mayor detalle en esta sección, es más sencillo poder unir ambos conceptos si pensamos en los fotones como excitaciones de un campo electromagnético contenido en una cavidad, de modo que dicha radiación, al estar forzada a cumplir con las ecuaciones de Maxwell y con las condiciones de frontera dadas por los parámetros de la cavidad,

tiene entonces modos de oscilación específicos como únicas posibilidades, y dichos modos a su vez definen posibles frecuencias que entonces corresponden a cada fotón en esa cavidad.

Las frecuencias características de cada onda de luz dentro de una cavidad (fotón) son fundamentales para la existencia del láser, pues permiten explicar los procesos de absorción y emisión inducida de los que hablaremos más adelante.

Para simplificar el problema de cuantizar el campo electromagnético, suponemos que tenemos un haz de luz que se propaga en una cavidad de longitud L , en dirección \hat{z} positiva. En la frontera se anula el campo eléctrico y además asumimos que está polarizado en dirección \hat{x} , entonces las ecuaciones de Maxwell quedan como

$$\nabla \cdot \bar{D} = \rho_L.$$

$$\nabla \cdot \bar{B} = 0.$$

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}.$$

$$\nabla \times \bar{H} = \bar{J}_L + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}.$$

Suponiendo que tenemos el campo confinado en una cavidad tal que la dirección de propagación está en \hat{z} y está en un intervalo tal que $0 \leq z \leq L$, con polarización lineal en \hat{x} , tomando el caso en el que no hay fuentes de radiación ni corrientes, estando en un medio isotrópico y homogéneo de tal forma que $\bar{D} = \epsilon \bar{E}$ y $\bar{H} = \frac{1}{\mu} \bar{B}$ entonces se tienen las siguientes soluciones a las ecuaciones de Maxwell

$$\bar{E}(z, t) = E_0 e^{ikz} e^{-i\omega t} \hat{x}.$$

$$\bar{B}(z, t) = B_0 e^{ikz} e^{-i\omega t} \hat{y}.$$

Donde ω representa la frecuencia de onda y k cumple la relación $k = \sqrt{\epsilon\mu} \frac{\omega}{c}$.

Teniendo el campo electromagnético se puede calcular la energía del sistema U usando la densidad de energía como se muestra en la siguiente ecuación

$$U = \frac{1}{2} \epsilon \int |\bar{E}(z, t)|^2 dV + \frac{1}{2} \frac{1}{\mu} \int |\bar{B}(z, t)|^2 dV.$$

Haciendo $q(t)$ y $p(t) = \dot{q}(t)$ los factores que contienen la parte temporal en la expresión para la energía, se puede llegar a la conclusión de que el campo electromagnético corresponde al problema del oscilador armónico con $m = 1$ como se muestra a continuación en el Hamiltoniano del sistema

$$\mathcal{H} = \frac{p^2}{2} + \frac{\omega^2}{2} q^2.$$

Ahora bien, para cuantizar el campo, se hace el uso de la cuantización canónica, haciendo que los paréntesis de Poisson sean conmutadores y los observables convertirlos en operadores tal que

$$\hat{\mathcal{H}} = \frac{\hat{p}^2}{2} + \frac{\omega^2}{2} \hat{q}^2.$$

$$[\hat{q}, \hat{p}] = i.$$

Oscilador Armónico Cuántico

El Oscilador armónico es un fenómeno muy importante en la física, debido a que se presenta en muchos de los fenómenos de la naturaleza y aunque no se manifieste explícitamente, casi en cualquier problema se

puede encontrar una región del sistema en la que se puede hacer una aproximación bastante precisa a un oscilador armónico.

El Hamiltoniano del oscilador armónico con $m = 1$ es

$$\hat{H} = \frac{\hat{p}^2}{2} + \frac{w^2}{2} \hat{q}^2.$$

Para simplificar la resolución del problema del oscilador armónico, es conveniente definir los siguientes operadores

$$\hat{a} = \sqrt{\frac{w}{2\hbar}} \left(\hat{q} + \frac{i}{w} \hat{p} \right).$$

$$\hat{a}^\dagger = \sqrt{\frac{w}{2\hbar}} \left(\hat{q} - \frac{i}{w} \hat{p} \right).$$

De tal forma que podemos escribir al Hamiltoniano en término de los operadores anteriormente construidos, de forma que a más adelante nos será conveniente trabajar con el Hamiltoniano de esta forma

$$\hat{H} = \hbar w \left(\hat{a}^\dagger \hat{a} + \frac{1}{2} \right).$$

Tal que quedan las ecuaciones de autovalores como se muestra a continuación

$$\hat{H}|n\rangle = E_n|n\rangle.$$

Solucionando la ecuación usando el Hamiltoniano en términos de los operadores anteriormente definidos, se puede llegar a la siguiente expresión, que representa la discretización de la energía.

$$E_n = \hbar w \left(n + \frac{1}{2} \right).$$

Si calculamos lo que le hacen los operadores \hat{a}^\dagger y \hat{a} a los estados $|n\rangle$ se puede observar que lo que hacen es aumentar y disminuir los niveles de energía, por lo que generalmente se les llaman operadores "creación" y "destrucción". Lo anterior se describe en las siguientes ecuaciones

$$\hat{a}^\dagger|n\rangle = \sqrt{n+1}|n+1\rangle.$$

$$\hat{a}|n\rangle = \sqrt{n}|n-1\rangle.$$

Donde n es el número de cuantos asociado a cada estado y por consiguiente se le asocia a los niveles de energía del sistema.

Recordando que, en mecánica cuántica, el estado base es el correspondiente a cuando $n = 0$ por lo que le corresponde el ket $|0\rangle$, el estado base es el estado del cual podemos partir para construir los demás estados. Entonces ayudándonos del operador creación, se puede ver la relación que existe entre dicho operador y los estados $|n\rangle$ como se muestra en la siguiente ecuación.

$$|n\rangle = \frac{1}{\sqrt{n!}} (\hat{a}^\dagger)^n |0\rangle.$$

El estado base se puede calcular la solución como función de onda por medio de la ecuación de Schrodinger, la cual le corresponde una función Gaussiana, sin embargo, para este caso particular, al estar trabajando en espacio de Bra-Kets no es de relevancia.

Estados Coherentes

Ahora se quiere calcular cual es el estado del haz de un láser, como se vió anteriormente, el Hamiltoniano del sistema corresponde al del oscilador armónico. Evidentemente tenemos presencia del campo electromagnético, utilizando el teorema de Ehrenfest, el cual nos dice que el valor esperado de un observable cuántico corresponde análogamente a un resultado clásico, al hacer los cálculos para el oscilador armónico se muestra que en este caso no se cumple el anterior teorema, debido a que los valores esperados para los campos eléctricos y magnéticos son nulos. Por lo anterior, es importante buscar un estado el cual cumpla con hacer esa conexión a los resultados clásicos como lo menciona el teorema de Ehrenfest.

$$\langle n | \hat{E}(z, t) | n \rangle = 0.$$

$$\langle n | \hat{B}(z, t) | n \rangle = 0.$$

Se requieren unos estados que sean autoestados del operador destrucción y cumplan lo anterior, por lo que se construye un estado que sea una superposición de todos los estados $|n\rangle$ como se muestra en la expresión siguiente

$$|\alpha\rangle = \sum_{n=0}^{\infty} C_n |n\rangle.$$

Siendo también autoestado de los operadores creación y destrucción de tal forma que α es el autovalor correspondiente para \hat{a}

$$\hat{a}|\alpha\rangle = \alpha|\alpha\rangle.$$

Se puede calcular explícitamente la expresión para este estado $|\alpha\rangle$, tomando la siguiente forma

$$|\alpha\rangle = e^{-\frac{1}{2}|\alpha|^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\alpha^n}{\sqrt{n!}} |0\rangle.$$

Ahora bien, si realizamos el cálculo de los valores esperados, se obtiene justo lo que se buscaba, hacer la conexión con el resultado clásico como se esperaba

$$\langle \alpha | \hat{E} | \alpha \rangle \propto ||\bar{E}(z, t)||$$

Algo importante a destacar de los estados coherentes es que efectivamente como su nombre lo dice, estos se mantienen coherentes a través del tiempo como se muestra en la siguiente expresión

$$|\alpha(t)\rangle = e^{-i\frac{w}{2}t} |e^{-iwt}\alpha\rangle.$$

Si calculamos los valores medios de la posición y el momento en los estados coherentes, podemos notar la relación que tienen estos con la parte real e imaginaria de los autovalores de los estados coherentes y consecuentemente calculamos la incertidumbre de ellos, es decir, Δx y Δp . Podemos observar que los estados coherentes son los estados de mínima incertidumbre debido a que su producto es igual a $\frac{\hbar}{2}$ como se muestra a continuación

$$\alpha = \sqrt{\frac{2\hbar}{w}} \bar{x} + i\sqrt{2w\hbar} \bar{p}.$$

$$\Delta x \Delta p = \frac{\hbar}{2}.$$

Ahora bien, es importante poder predecir la probabilidad de detectar n fotones en un estado coherente, con todo lo anterior es sencillo calcularla, de forma que esta toma forma de una distribución de Poisson, como se muestra a continuación

$$P(n) = |\langle n|\alpha\rangle|^2 = \frac{|\alpha|^{2n}}{n!} e^{-|\alpha|^2}.$$

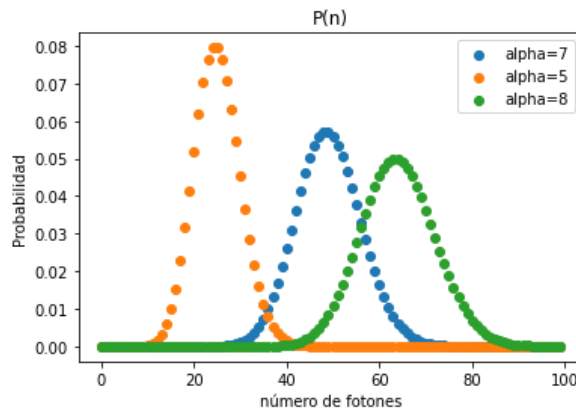


Figura 1. Probabilidad de encontrar n fotones en un estado coherente

Niveles de energía en un átomo

Si bien el principio de incertidumbre de Heisenberg excluye la posibilidad de conocer con exactitud la posición de los electrones que rodean un núcleo atómico en todo momento de manera determinista, de acuerdo con el modelo atómico de Bohr sí podemos distinguir los llamados “orbitales”, que corresponden a regiones espaciales donde los electrones gozan de una estabilidad de otra manera inexplicable. En mecánica cuántica, se habla del estado del átomo, que es descrito por una función de onda cuya descripción incluye los “niveles de energía” en el átomo, haciendo referencia a dichos orbitales. Ahora bien, de acuerdo con esta teoría, cada electrón que se encuentra en un orbital dado tiene una energía muy particular, dada por la siguiente ecuación en el caso más sencillo (esto es, para una primera aproximación del átomo de Hidrógeno) [2]:

$$E_n = -\frac{1}{2} \mu c^2 \frac{(Z\alpha)^2}{n^2} \quad (4)$$

Donde n se refiere precisamente al nivel energético en cuestión. Vemos entonces que la energía de cada electrón tiene una relación de proporcionalidad inversa con el cuadrado del nivel energético en el que se halla.

Por otra parte, el factor Z hace referencia a la carga eléctrica del núcleo, mientras que α es la constante de estructura fina de la materia, cuyo valor aproximado es $\alpha \approx 1/137$

Además, μ es la masa reducida del sistema, cuyo valor viene dado en términos de la masa del electrón (m_e) y la del núcleo (M) por:

$$\mu = \frac{m_e M}{m_e + M} \quad (5)$$

Dada esta discretización de las energías posibles, se tiene que toda diferencia energética entre distintos niveles puede ser descrita de la siguiente manera:

$$|\Delta E_n| = E_n - E_m = p\hbar\omega \quad (6)$$

Siendo $m \neq n$ y $p \in \mathbb{Z}$.

Interacción radiación – materia: Coeficientes de Einstein.

Es posible para un electrón en un orbital dado pasar a un nivel de menor energía, emitiendo en el proceso un fotón cuya energía sea exactamente la diferencia $|\Delta E_n|$ entre los orbitales involucrados; a este proceso se le llama emisión espontánea cuando ocurre sin algún agente externo involucrado y como consecuencia únicamente del paso del tiempo, pues transcurrido cierto tiempo característico, denominado “tiempo de vida” del nivel, el átomo tiende al nivel de menor energía de manera natural.

No obstante, si un átomo en cuestión es expuesto a radiación cuya longitud de onda corresponda con la frecuencia asociada precisamente a la diferencia de energía entre dos orbitales $|\Delta E_n|$, se pueden presentar dos fenómenos: “absorción inducida” y “emisión inducida”. En el primero, la radiación incidente es absorbida por el átomo para así emplear la energía (que correspondía al fotón) en pasar a un nivel excitado. Por otro lado, en la emisión inducida esta radiación provoca que el átomo emita otro fotón con propiedades de polarización, energía y fase idénticas a aquellas correspondientes a la radiación incidente, de modo que al emitir energía, el átomo cambie su estado a uno de menor energía.

Algo que es de suma importancia tener presente, es que ambos procesos de interacción radiación – materia (tanto la absorción como la emisión) son posibles si y sólo si los fotones a los que es expuesta la muestra de material tienen como energía exactamente la correspondiente a la diferencia entre dos niveles del átomo. Si la energía de los fotones es distinta, los procesos no se llevan a cabo en absoluto.

Estos tres procesos fueron descritos por Einstein, quien asignó coeficientes de probabilidad de ocurrencia por unidad de tiempo a cada proceso y con ellos expresó la evolución temporal del sistema a través de la siguiente ecuación, en la que se denota con el subíndice 2 al nivel excitado en cuestión y por el subíndice 1 el nivel de menor energía en cada cambio, respectivamente:

$$dN_1/dt = -dN_2/dt = N_2A_{21} - N_1B_{12}\langle W(\omega) \rangle + N_2B_{21}\langle W(\omega) \rangle \quad (7)$$

Donde: A_{21} es el coeficiente correspondiente a la emisión espontánea, $B_{12}\langle W(\omega) \rangle$ el asignado para la absorción inducida en función de la energía de radiación y $B_{21}\langle W(\omega) \rangle$ haciendo alusión a la emisión inducida en función también de la energía de radiación.

La ecuación 6 describe las fluctuaciones en la ocupación de cada nivel (N_i) con el paso del tiempo, considerando que aun cuando al realizar un promedio temporal en el sistema se hallen poblaciones constantes en cada nivel, si se hace una medición en cada instante hay en realidad fluctuaciones producidas por la interacción radiación-materia en el caso de los procesos inducidos y fluctuaciones naturales en el caso de la emisión espontánea [2].

En el caso de un sistema en equilibrio, tomando el caso límite en que las derivadas temporales se anulan (considerando el sistema por instantes), mediante uso de conceptos de mecánica estadística como la ley de Boltzman para sistemas en equilibrio, se derivan relaciones entre cada coeficiente de Einstein de modo que la ecuación quede únicamente en términos de uno de los tres procesos, simplificando el problema notoriamente.

Estas relaciones entre los coeficientes son:

$$g_1B_{12} = g_2B_{21} \quad (8)$$

Y

$$(\hbar\omega^3/\pi^2c^3)B_{21} = A_{21} \quad (9)$$

Donde g_i denota la degeneración de cada estado.

Finalmente, es necesario recordar que la mecánica cuántica no es determinista, de modo que cuando se dice que la exposición a radiación de cierta frecuencia correspondiente a la energía de transición entre niveles modifica el estado de los átomos de la muestra en cuestión, en realidad lo que ocurre es que la probabilidad de encontrar a cada átomo en un estado u otro se ve modificada considerablemente, de manera que en total en el conjunto de átomos se ve modificada la población promedio de cada nivel, más no que cada átomo de la muestra cambia automáticamente de nivel.

Una vez dicho esto, notamos que la relación 7 deja de manifiesto que, en el caso simplista de no degeneración, los coeficientes correspondientes a la absorción y emisión inducidas son iguales, es decir que usualmente la probabilidad de ocurrencia de uno u otro proceso es la misma.

Láser: Principio de funcionamiento y propiedades.

Para poder crear un láser (nombre dado por las siglas "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation", es decir, Amplificación de Luz por emisión estimulada de radiación) es necesario evidentemente que el proceso preponderante sea emisión inducida, que permita amplificar la radiación incidente. Para lograrlo, lo que se hace es producir en el sistema de átomos con que se esté tratando lo que se denomina una "inversión de población" al añadir con alguna fuente energía de tal forma que la cantidad de átomos en el nivel excitado sea mucho mayor al de átomos en estado base o de menor energía. Este proceso es llamado "bombeo" y puede hacerse por métodos químicos, ópticos o eléctricos, según el tipo de láser. Cabe mencionar que, aunque el láser creado durante la investigación fue *de fibra óptica*, la fuente de bombeo empleada en el proceso fue un láser *de estado sólido*.

Una vez que se tiene la inversión de población sobre la muestra a partir de la cual se producirá el láser, (que es seleccionada entre otras cosas según la característica diferencia de energía entre los niveles que permiten la emisión inducida, pues recordemos que ella determina la longitud de onda del láser), se le expone a la radiación electromagnética que permita la emisión estimulada por parte de dicha muestra, tras lo cual la radiación así obtenida (que es la suma de la inducida por el experimentador y la emitida por la muestra) se hace pasar por una cavidad compuesta por dos superficies reflectantes alejadas cierta distancia que debe ser un múltiplo entero de la longitud de onda de la luz encerrada en la cavidad [3]; de dichas superficies, una ha de ser totalmente reflejante para mantener la luz resonando dentro de este espacio, así como usualmente cóncava, con el fin de enfocar la luz para reducir las posibles pérdidas por difracción (aunque en el caso del láser de fibra óptica la concavidad no es necesaria, pues la reflexión interna total de la fibra se encarga de este punto).

Así pues, en esta cavidad se hace rebotar entre las superficies reflectantes la luz amplificada que a su vez va produciendo más fotones mediante emisión inducida cada vez que vuelve a atravesar esta cavidad, hasta lograr alcanzar la intensidad deseada, punto en el que cierta cantidad de luz es transmitida por la otra superficie reflectante, la cual es típicamente un espejo semitransparente que permite el paso de cierta cantidad de luz.

La luz así transmitida por el espejo semitransparente es entonces el haz del láser de salida, que se distingue de otros tipos de luz emitidas por otras fuentes por presentar la propiedad fundamental de "coherencia", concepto que engloba el que la luz de un láser es monocromática, posee una directividad sumamente notable y casi ningún desfase aún tras recorrer largas distancias, lo que permite que presente fenómenos de interferencia.

Entre más coherente la luz, más evidente la interferencia que pueda presentar.

La monocromaticidad, por un lado, se refiere a que el rango de longitudes de onda que componen al rayo láser es sumamente reducido, comprendiendo apenas un ancho de aproximadamente 20 a 40 nm como máximo.

Cabe resaltar que, nuevamente, el principio de incertidumbre de Heisenberg es el que prohíbe la existencia de una fuente de luz con monocromaticidad perfecta, pues para tener una anchura infinitamente pequeña (esto es, un haz perfectamente monocromático), haría falta un tiempo de vida infinito, lo cual equivale a que el haz haya estado desde siempre y continúe para siempre [4].

Por otra parte, la directividad y ausencia de desfase se deben a que, como se mencionó anteriormente, los fotones producidos en el átomo por emisión inducida son idénticos a aquellos correspondientes a la radiación que genera el proceso, de modo que tienen la misma polarización, dirección, velocidad de fase, y fase, por lo que en cualquier sección transversal de la onda de luz, la fase es prácticamente la misma. Entre mayor

sea la distancia que pueda recorrer el haz sin presentar desfases, se dice que mayor es la coherencia espacial.

Teóricamente, la fluctuación en la frecuencia (f) del láser puede ser hallada en términos de características de la cavidad resonante empleada para construir en láser, mediante la siguiente ecuación [5]:

$$\delta f = \frac{2\pi hf(\Delta\nu)^2}{P} \quad (10)$$

Donde $\Delta\nu$ corresponde a la mitad de la anchura de la cavidad resonante y P es la potencia de la luz emitida por el medio activo mediante la emisión estimulada.

La fibra óptica y sus aplicaciones

Como su nombre lo dice, es una fibra construida de materiales como plástico, silicia, cristal o polímeros, con un diámetro de 190 a 240 micras. Los elementos que las constituyen son tres: Núcleo, polímero y recubrimiento. El recubrimiento es la parte más exterior de la fibra y el encargado de que no haya un colapso en el interior que afecte a su funcionamiento; regularmente los materiales del que están hechos son plásticos transparentes o de algún otro color que la diferencien los tipos de fibra. El polímero es el elemento que cubre al núcleo y es una de las partes más importantes debido a que tiene un índice de refracción mayor al recubrimiento, más adelante se explicara su importancia. El núcleo es por donde la luz se traslada, puede seguir un único camino dentro de la fibra o incluso tener diversos dependiendo de las características que tenga.

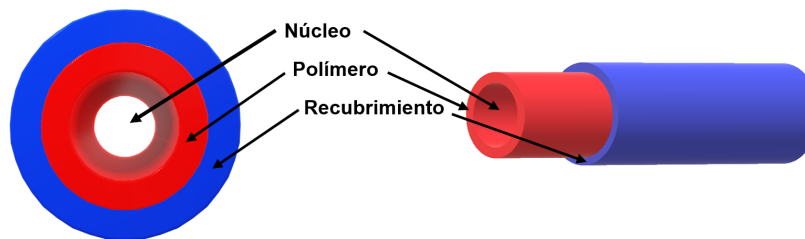


Figura 2. Diagrama de fibra óptica.

El uso de la fibra óptica comienza en el año de 1950, para esta época la teoría cuántica, el electromagnetismo y el comportamiento de la luz eran conceptos con pocos años de vida. Los inicios de la fabricación de la fibra óptica tuvieron varios retos para los investigadores de la época, esto debido a que se tenían demasiadas pérdidas al introducir el haz de luz en la fibra; los materiales que se usaban y sus métodos fueron poco a poco mejorando lo suficiente para que la construcción de láseres y la transmisión de datos no se limitara a distancias de pocos kilómetros.

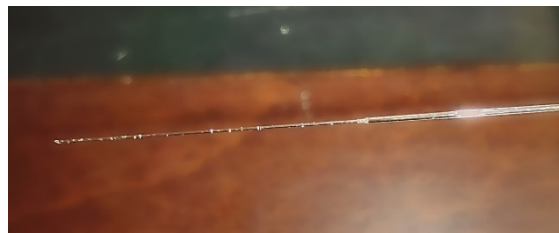


Figura 3. Fibra óptica real.

Al introducir un haz de luz en la fibra veremos como por el otro lado hay una salida, intuitivamente podremos pensar que se trataría como pasar agua por una manguera o con cualquier fibra y con cualquier método de construcción, pero no es así. Lo que es relevante es el índice de refracción, definido formalmente como un cociente entre la velocidad de la luz (en el vacío con un valor de 300 millones de metros por segundo) y la velocidad de la luz ahora en el medio por el que se mueva. El comportamiento de la luz cuando se encuentra

en diferentes medios es que se reflejaran parcial o totalmente dependiendo del índice de refracción de los medios.

En una fibra óptica la diferencia de índice de refracción entre el polímero y el recubrimiento es tal que al introducirse luz en la fibra es posible lograr que el haz se refleje totalmente dentro del núcleo quedando confinada. Si tuviéramos en el exterior un índice de refracción mayor al del polímero tendríamos demasiadas pérdidas de luz y sería casi imposible crear una guía de onda.

Uno de los factores importantes a tomar en cuenta para una fibra óptica es el **modo** dentro de la fibra. Cuando la luz entra en el núcleo crearemos una guía de onda en la que hay una propagación uniforme de los campos electromagnéticos, las características de dispersión, índice de refracción y longitud de onda cambian las maneras en la que la luz se propaga por lo que existirán fibras **multimodo**; además de los modos dentro del núcleo, también hay modos para una propagación en la que una guía de onda se consigue ahora en la cubierta de la fibra, aunque este tipo de modos no son útiles para las telecomunicaciones. Un ejemplo práctico de los modos dentro la fibra óptica son los **modos linealmente polarizados**, en este tipo todas las características tanto de la fibra como de la luz son tomadas en cuenta para saber la forma en que se propaga la energía dentro del núcleo y su constante de propagación: Longitud de onda emitida, índices de refracción y radio del núcleo.

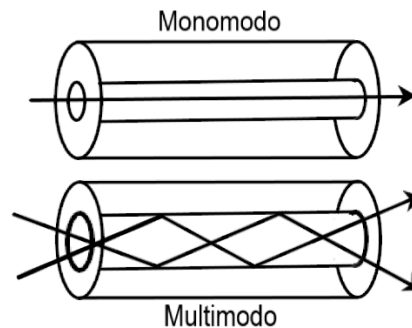


Figura 4. Diagrama modos de la fibra.

En la práctica el estudio teórico para el comportamiento de la luz dentro de una fibra óptica es algo complejo, en los párrafos previos es una sobre simplificación usando una descripción en términos de rayos. En realidad, la luz no se traslada uniformemente en el espacio, sino que lo hace en **paquetes de onda**, estos paquetes se tratan de un grupo de ondas superpuestas linealmente, trasladándose por el espacio hasta dispersarse.

Una parte teórica importante para el estudio de la dispersión y los paquetes de ondas es la **velocidad de fase** y **velocidad de grupo**. En una única onda desplazándose por el espacio la velocidad de fase se define como un cociente entre la frecuencia (ω) y el vector de onda (k), en el caso de tener dos o más ondas desplazándose a una propia frecuencia y vector, esta relación se modifica incluyendo las derivadas parciales de ω y k ; A esto le llamaremos velocidad de grupo.

$$v_f = \frac{\omega}{k} \quad v_g = \frac{\partial \omega}{\partial k}$$

Un ejemplo de la fibra óptica monomodo es la SMF-28; sus propiedades la han hecho ideal no solamente para redes de telecomunicación, sino que también para proyectos de investigación en la construcción de láseres. Las características de esta fibra hacen que al ingresar luz blanca en el núcleo la dispersión que habrá será **dispersión cromática por guía de onda** donde la diferencia de índice de refracción en el núcleo y el recubrimiento harán que diferentes longitudes de onda viajen ya sea más cerca del núcleo (Infrarrojo), o cerca del recubrimiento (Violeta) provocando que la distancia a la cual se quiera transmitir la luz sea muy corta e innecesaria si se requiere transmitir pulsos a larga distancia.

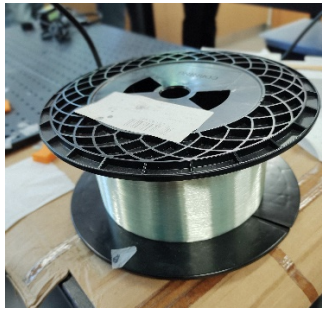


Figura 5. Rollo de fibra SMF-28.

La manera en cómo se ha tratado de disminuir esta dispersión es a partir de que los láseres sean lo más monocromático posible, el emitir a una longitud de onda pura se evita la dispersión en buena medida; además de ello se han buscado alternativas como la **técnica de inversión espectral** o aprovechando la **ley de Bragg** utilizando rejillas que permitan el paso de una longitud de onda específica.

Las rejillas de Bragg han sido una de las grandes herramientas en la óptica para la construcción de láseres y los estudios físicos. Su funcionamiento se basa en una máscara holográfica sobre la fibra óptica y con una separación específica entre cada rendija; al momento de hacer pasar un haz de luz por la rejilla se podrá observar en un espectrómetro que se reflejará una longitud de onda específica

El camino de la luz que deberá ser transmitida no tendrá ninguna variación, a excepción de la longitud de onda a la que está diseñada que sea reflejada. Si se colocara otro espectrómetro en el inicio del bombeo veremos que hay un pico en la longitud de onda faltante en la segunda medición. Teóricamente estas rejillas siguen el comportamiento de la luz en dos índices de refracción en los cuales se puede reflejar como en un espejo o transmitir sin afectar su camino. Las ecuaciones que describen su funcionamiento relacionan la separación de las rejillas y el índice de refracción efectivo en el núcleo de la fibra; de esto podremos obtener la longitud de onda de Bragg y se trata de la longitud de onda que será reflejada por la rejilla



$$\lambda_B = 2n_e\Lambda$$

Figura 6. Diagrama Rejilla de Bragg y ecuación de longitud de onda.

Ahora, dos rejillas de Bragg pueden ser utilizada para la creación de láseres e incluso crear una cavidad; sin embargo, es posible usar diferentes esquemas que permiten reemplazar una de las rejillas, por ejemplo un simple corte en la fibra (adecuado) o bien una microesfera en la punta de la fibra.

Los proyectos de investigación científica son los principales dadores a la sociedad de la manera en cómo podemos comunicarnos y no solo eso, sino que también llegar a la frontera del conocimiento en la física moderna. Para esto primero se estudió el comportamiento de ciertos elementos, en específico el **Erbio** cuyos niveles de energía podrían permitir una emisión de esta longitud de onda; para ello se bombeo al elemento con láseres de 960 nm, esto generara un proceso denominado **inversión de población** que ya fue mencionado previamente, en el que se excitan a los átomos de la tierra rara y los electrones aumentan los niveles de energía de tal forma que al volver a su estado original emitan luz (Emisión estimulada).

Para la construcción de láseres se aprovecha este método teniendo un bombeo original el cual se hace pasar por fibra óptica empalmada (Unida) a otro tipo de fibra, la **fibra dopada** cuya característica principal es que tiene átomos de alguna tierra rara en su interior; la manera en que se puede tener este elemento ya incluido

es debido a su proceso de fabricación en el que combinan el silicio con la tierra rara y cuidando que la pureza sea tal que no haya algún otro elemento incluido que afecte al índice de refracción en el núcleo.

La fibra óptica ha tenido una gran evolución a lo que era en sus primeros años. Diversos métodos de fabricación han mejorado su funcionamiento a tal grado que une a continentes con su uso, pero también ha evolucionado más allá en su diseño con las **fibras de cristal fotónico (PCF)**. El concepto de este tipo de fibra comienza en la década de los 90s y siguen el principio de los cristales fotónicos al tener una estructura periódica a lo largo de la fibra, si se incide luz en la fibra esta quedara confinada en el núcleo hueco o solido de maneras en la que las fibras ópticas convencionales no lo podrían hacer. El método de construcción consiste en tener una estructura con el patrón ya dentro de la fibra, posteriormente comienza a estirarse hasta que se obtiene una fibra óptica con un núcleo de aproximadamente 5 micras y 4 micras para cada elemento de la microestructura. Al igual como sucede en una rejilla de Bragg en la que se mencionó que gracias a la máscara holográfica solo deja pasar una cierta longitud de onda, en las FCF sucede lo mismo al crear interferencia destructiva en un rango específico o "prohibido".

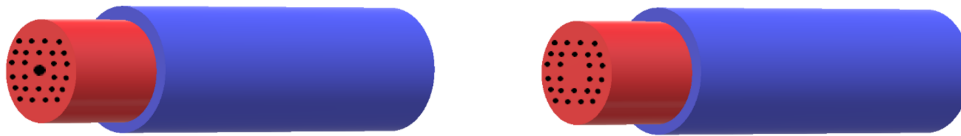


Figura 7. Diagrama fibras de cristal fotónico.

El diseño en las PCF es algo muy importante a tomar en cuenta dependiendo del tipo de comportamiento que se quiere estudiar, al tener un núcleo solido en la fibra la diferencia de índice de refracción entre el núcleo y los huecos periódicos es tal que el confinamiento de la luz es total cosa que en dispositivos ópticos no lineales esta propiedad es ideal. Si en cambio el núcleo es hueco sucede un efecto diferente en los índices de refracción, ahora el núcleo tiene un índice menor al de su recubrimiento periódico por lo que se tiene un efecto de interferencia destructiva y como fue mencionado antes un rango específico, este rango puede ser aprovechado para transmitir ciertas longitudes de onda que en las fibras ópticas convencionales se lograría.

Otra aplicación en la que la fibra óptica es una parte primordial es en los sensores de fibra óptica, este tipo de sensores son muy utilizados en la industria para las líneas de producción. Uno de los elementos que los constituyen es el **piezoeléctrico**, el principio piezoeléctrico se obtiene de materiales que al ser sometidos a una compresión generan un voltaje este efecto también puede ser generado a la inversa, al dar un voltaje sobre el material que generara una deformación en el material.

Un sensor de fibra óptica funciona al tener una fibra unimodal que detectara si hay alguna anomalía en el proceso, mandara una señal eléctrica para separar el producto y comenzar de nuevo. Dependiendo del tipo de sensor se puede utilizar un actuador piezoeléctrico el cual actúa convirtiendo una señal eléctrica en un desplazamiento físico.

Supercontinuo

Una propiedad característica de los láseres es la potencia que alcanza su haz al tener una densidad energética muy grande, lograda en gran medida gracias a la gran directividad del haz que sufre muy poca dispersión al propagarse, distinguiéndose así de otras fuentes de luz. Sin embargo, una propiedad del resto de fuentes es que suelen radiar en un amplio espectro, no solo en un rango muy reducido de longitudes de onda.

No obstante, existe tecnología que logra combinar propiedades de fuentes comunes de luz con características de láseres unimodales, pues mediante la propagación de pulsos ultra energéticos de láseres de muy alta potencia (los cuales son de picosegundos, con una frecuencia de repetición de decenas de MHz) a través de medios no lineales (como fibras ópticas de cristal fotónico) es posible generar un espectro continuo y amplio de luz coherente y de potencia mucho mayor a la obtenida con cualquier otra fuente de luz convencional.

A este fenómeno se le denomina "supercontinuo", y es una aplicación de mucha relevancia en el ámbito de la óptica no lineal. Se puede hablar de la obtención de supercontinuo desde que se logra producir una banda de frecuencias tan reducida como 60nm, con una profundidad de 5dB en adelante, aproximadamente.

Algunos ejemplos de cómo suceden en la fibra los efectos no lineales es la automodulación de fase o la dispersión debida al material, esta última muy importante debido a que si se tiene una sección transversal demasiado ancha la luz comenzara a perder intensidad, lo suficiente para que los efectos no lineales no puedan ser observados completamente. El supercontinuo como se introdujo previamente, se genera al inducir un bombeo de luz sobre una fibra óptica (Fibra de cristal fotónico) o algún cristal con el objetivo de ensanchar el espectro de emisión, cuando el efecto se logra la medición hecha sobre el espectro muestra el bombeo original más una medición en cada longitud de onda que se logró ensanchar.



Figura 8. Supercontinuo medido en un espectrómetro.

Una gran aplicación para el efecto del supercontinuo es con la **tomografía de coherencia óptica**, esta técnica se basa en el uso de luz de baja frecuencia para la generación de imágenes en dos y tres dimensiones para usos médicos o industriales.

Conclusión

Los conceptos de la física detrás de los láseres han permitido dar un avance drástico a la humanidad, día a día estamos inmersos en estos avances con las redes de internet que nos han permitido comunicarnos nacional e internacionalmente a una velocidad que muchos no hubieran podido imaginar. Además de este avance tecnológico también en la medicina la física está presente para ayudarnos, y en los procesos industriales que nos dan los productos en cada supermercado. Todo esto se debe a las grandes mentes de científicos (Maxwell, Plank, Bragg, Einstein etc.) que su curiosidad ha permitido conocer más allá y adentrarse a un mundo que no se puede ver a simple vista.

El trabajo de aprendizaje teórico dio una buena base de todos principios que se necesitan para la construcción de un láser de fibra óptica; por su parte el desarrollo experimental ayudó para observar toda la teoría en acción además de abrir nuestra curiosidad en la física cuántica, electromagnetismo e investigación científica y llevarnos a nuevas preguntas que aspiramos a resolver con la ayuda de nuestra formación académica.

Agradecimientos

Agradecemos profundamente a la Doctora Alejandrina Martínez por su guía y cátedra en el laboratorio y a Johanna Granados Ruiz por su orientación y asesoramiento en el laboratorio.

Referencias

- Loudon, Professor of Theoretical Physics Department of Electronic Systems Engineering Rodney. (2000).
The Quantum Theory of Light (3rd ed.). OUP Oxford.
- Gasiorowicz, S. (2003). Quantum Physics (3rd ed.). Wiley.
- Schwob, C., & Julien, L. (2010). Le laser : principe de fonctionnement. Reflets de la physique, 21, 12–16.
Recuperado de : <https://doi.org/10.1051/refdp/20102112> el 18/07/2022
- Hitz, B. C., Ewing, J. J., & Hecht, J. (2012). Introduction to Laser Technology (English Edition) (4.a ed.). Wiley-IEEE Press.
- Shimoda, K. (2014). Introduction to Laser Physics. Springer.
- A. Das. Lectures on Electromagnetism. World Scientific Publishing Company, 2013.
- Gerry, P. Knight, and P.L. Knight. Introductory Quantum Optics. Cambridge University Press, 2005.
- D.J. Griffiths. Introduction to Electrodynamics. Number v. 2. Cambridge University Press, 2017.
- D.J. Griffiths and D.F. Schroeter. Introduction to Quantum Mechanics. Cambridge University Press, 2018.
- R. Paschotta, artículo sobre ' coherencia ' en la RP Photonics Encyclopedia , accedido el 2022-07-24
- Basic Optics for Optical Fiber. (s. f.). Fosco Connect. Recuperado 23 de julio de 2022, de <https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/archive-posts/95048070-basic-optics-for-optical-fiber> colaboradores de Wikipedia. (2020, 21 agosto). Fibra de cristal fotónico. Wikipedia, la enciclopedia libre. Recuperado 10 de julio de 2022, de https://es.wikipedia.org/wiki/Fibra_de_cristal_fot%C3%B3nico
- Wave Equation, Wave Packet Solution. (s. f.). HyperPhysics. Recuperado 14 de julio de 2022, de <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Waves/wpack.html>
- Paschotta, R. (2022, 21 marzo). Supercontinuum Generation. 2022 RP Photonics AG. Recuperado 24 de julio de 2022, de https://www.rp-photonics.com/supercontinuum_generation.html
- Agarwal, T. (2021, 17 diciembre). Piezoelectric Actuator : Types, Working, Advantages & Its Applications. ElProCus - Electronic Projects for Engineering Students. Recuperado 24 de julio de 2022, de <https://www.elprocus.com/piezoelectric-actuator/>
- Uchino, Kenji. (2003). Introduction to Piezoelectric Actuators and Transducers. 41.