

Introducción al Láser y su aplicación práctica en la óptica moderna

Ing. Luis Diego Marín Naranjo M.Sc.
Laboratorio de Fotónica y Tecnología Láser
Escuela Ingeniería Eléctrica
Universidad de Costa Rica

Resumen: se presenta una descripción actualizada de que es un dispositivo Láser, los detalles de operación y diversos tipos existentes en el mercado, se describen posibles aplicaciones y se incluyen detalles de terminología para su uso.

Palabras clave: Láser, óptica, fotónica, radiación óptica, luz, coherencia

Introducción

El uso ampliamente esparcido y creciente del Láser requiere que las personas se familiaricen con los usos y los riesgos potenciales en el mal uso de este valioso producto de la ciencia moderna. Los Láseres se usan en muchas aplicaciones incluyendo procesamiento de materiales, construcción, medicina, comunicaciones, producción de energía, usos militares, soldadura, topografía, medicina, y como herramienta en muchas áreas de investigación científica. Muchos tipos de Láseres comercialmente disponibles cubren en tamaño desde dispositivos que pueden estar en la punta de un dedo y otros que llenan grandes edificios.

Todos los dispositivos Láser tienen ciertas características básicas en común. Un dispositivo Láser es una fuente de radiación óptica que exhibe propiedades únicas y una amplia variedad de aplicaciones.

De reciente importancia para consideraciones de seguridad es la introducción de dispositivos Láser en productos orientados al consumidor como escáner con Láser, fotocopiadoras e impresoras Láser y sistemas de disco compacto de audio y vídeo. La mayoría de dispositivos de estos mercados emiten relativamente bajos niveles de potencia y consecuentemente, ya que sus haces están encerrados, su uso no posee riesgos de Láser.

Generalidades de dispositivo Láser

Láser es un acrónimo de **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation (Emisión de luz por emisión estimulada de radiación). La energía generada por un Láser está dentro de la porción óptica del espectro electromagnético, según ilustra la figura 1.

Un haz Láser es no ionizante y abarca desde el ultravioleta (100 – 400 nm), visible (400-700 nm) e Infrarrojo (700 nm – 1 mm).

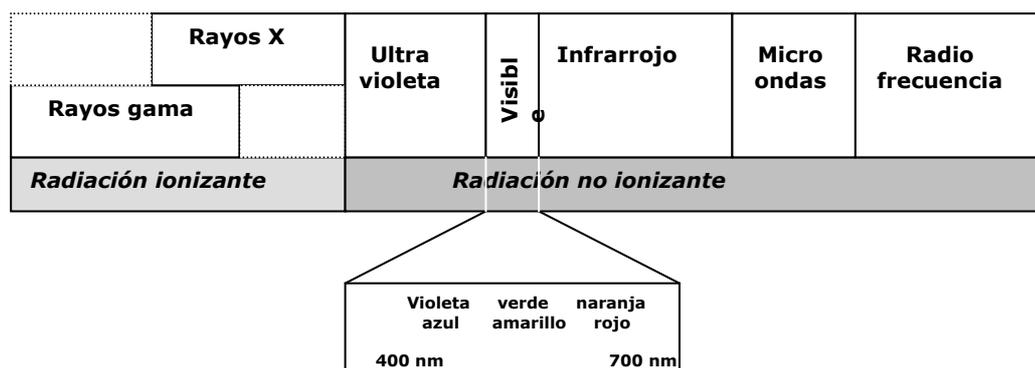


Figura 1. Espectro óptico.

La energía es amplificada a extremadamente altas intensidades por el proceso atómico de emisión estimulada. El término radiación es mal interpretado comúnmente ya que también se usa para describir materiales radioactivos o radiación ionizante.

El uso de la palabra en este contexto sin embargo se refiere a una transferencia de energía. La energía se mueve de una localidad a otra por conducción, convección o radiación.

La longitud de onda de un haz Láser expresa el color en caso de luz visible o radiación óptica invisible y la unidad más común para la longitud de onda es el nanómetro (nm).

Los Láser actuales emiten haces de radiación óptica. La radiación óptica (ultravioleta, visible e infrarrojo) se denomina radiación no ionizante para distinguirlo de la radiación ionizante como rayos X y rayos gamma que se conoce que produce efectos biológicos. Los Láser de rayos X están bajo desarrollo pero están limitados a pocos laboratorios especiales.

Un dispositivo Láser produce un haz intenso de radiación óptica (o de luz) altamente direccional. Si se dirige, refleja o enfoca sobre un objeto, el haz Láser será parcialmente absorbido, elevando la temperatura de la superficie y/o el interior del objeto, lo que causa una potencial alteración o deformación del material.

Estas propiedades, las cuales se han aplicado a la cirugía con Láser y al procesamiento de materiales, pueden también causar daño a los tejidos.

Además de estos obvios efectos térmicos sobre un tejido, pueden también darse efectos fotoquímicos cuando la longitud de onda del haz Láser es suficientemente corta (región UV o azul del espectro óptico).

La mayoría de Láseres de alta potencia se diseñan para minimizar el acceso al haz durante operación normal. Láser de baja potencia pueden emitir niveles de radiación óptica que no son riesgo. El cuerpo humano es vulnerable al haz de salida de ciertos Láseres y bajo ciertas circunstancias la exposición puede resultar en daño al ojo y la piel. Se ha conducido investigación relacionada a los umbrales de daño al ojo y la piel para entender los riesgos biológicos del Láser.

Notas técnicas:

- Se utiliza el término **luz** solamente para el ámbito visible y el término **radiación óptica** para todo el ámbito óptico desde ultravioleta (UV), pasando por visible hasta infrarrojo IR.
- Se utiliza el término **haz Láser** para al efecto de la propagación concentrada (Gausiano) resultante desde un dispositivo Láser, el cual se analiza en esta guía como causante de problemas y por lo cual se deben seguir aspectos de seguridad.
- El término **dispositivo Láser** se utiliza para referirse al aparato o equipo que genera el haz por medio de emisión estimulada desde un medio gaseoso, estado sólido, semiconductor, líquido u otro, siendo este aparato o equipo complejo o simple.
- No es recomendable utilizar el término **luz Láser** ni **radiación Láser** ya que es redundante del acrónimo.
- El término **rayo Láser** se aplica solo si se analiza una situación de óptica geométrica pero no es aconsejable en casos de óptica física u óptica cuántica. Se usará en el caso general que así lo amerite.

Propiedades de un haz Láser

La radiación emitida por un Láser es diferente de la producida por una fuente de luz o radiación óptica más común como los bombillos incandescentes, lámparas fluorescentes y lámparas de arco de alta intensidad. Un entendimiento de las propiedades únicas del haz Láser se logra al contrastarlo con la luz producida por fuentes más convencionales.

Monocromaticidad

La radiación óptica consiste de ondas que viajan a través del espacio. El color de la luz lo determina la longitud de onda de la onda, figura 2.

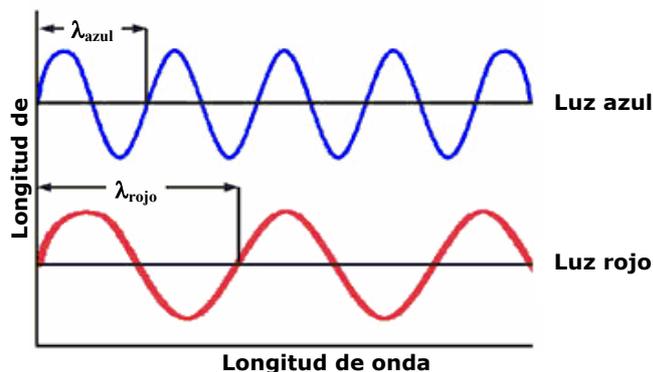


Figura 2. Comparación de las longitudes de onda del rojo y el azul

La longitud de onda es la distancia sobre la que la onda se repite y se representa por la letra λ . Cada color tiene su longitud de onda característica. La luz blanca consiste de una mezcla de muchas diferentes longitudes de onda. Un prisma puede dispersar la luz blanca en sus longitudes de onda componentes, figura 3.

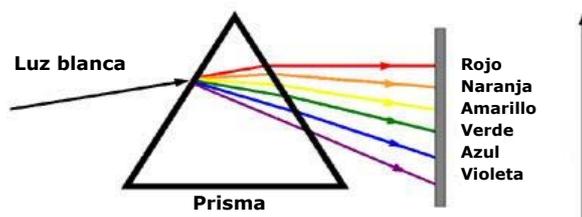


Figura 3. Dispersión de luz blanca por un prisma

Todas las fuentes de luz común emiten en muchas longitudes de onda. La luz blanca contiene la mayoría de los colores del espectro visible y luz coloreada común cubre un ámbito particular de longitudes de onda del espectro visible. Una luz verde de semáforo emite la porción del verde del espectro así como longitudes de onda de amarillos y azules vecinos.

El haz de un Láser HeNe (Helio Neón) es de un color rojo muy puro. Consiste de un ámbito muy angosto de longitudes de onda alrededor de 632,8 nm. Se dice que es cuasi monocromático, figura 4. Esta propiedad es única en un haz Láser por lo que se dice que tiene una longitud de onda simple. La radiación óptica perfectamente monocromática no puede ser producida aún por un Láser pero esta es muchas veces más monocromática que otras fuentes de luz.

En algunas aplicaciones, se emplean técnicas especiales para hacer más angosto el ámbito de longitudes de onda en la salida y así incrementar la monocromaticidad.

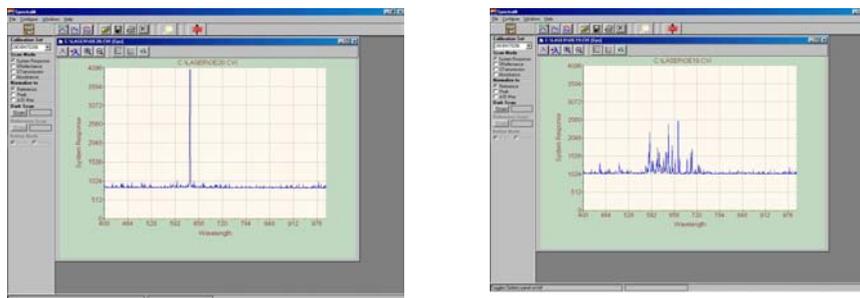


Figura 4. Longitud de onda de un Láser HeNe y tubo de plasma

Direccionalidad

La figura 5 ilustra radiación óptica emitida desde un bombillo en todas las direcciones. Todas las fuentes de luz comunes emiten de esta manera.



Figura 5. Fuente convencional de luz

Dispositivos como los faros de los automóviles y los proyectores contienen sistemas ópticos que coliman la luz y esta se emite en un haz direccional pero sufre de divergencia y se esparce más rápidamente que el haz generado por un dispositivo Láser.

La figura 6 ilustra la naturaleza altamente direccional de un haz Láser. La direccionalidad es la característica que causa que el haz viaje en una dirección simple dentro de un cono angosto de baja divergencia.



Figura 6. Direccionalidad del haz Láser y su divergencia

Pero un haz perfectamente paralelo, denominado haz colimado, no puede ser producido. Todos los haces de radiación óptica divergen al moverse por el espacio. Un haz Láser es más colimado, o sea más direccional que la luz de fuentes más convencionales y así son menos divergentes.

En algunas aplicaciones se emplean sistemas ópticos con Láseres para mejorar la direccionalidad del haz de salida. Un sistema de este tipo puede producir una mancha de solo 800 m de diámetro sobre la luna (a una distancia de 384 000 km).

Coherencia

La figura 7 muestra un haz paralelo de radiación óptica desde una fuente común como ondas que viajan por el espacio. Ninguna de estas ondas presenta relación con las otras ondas dentro del haz. Se dice que esta luz es incoherente, o sea, no hay un orden interno.

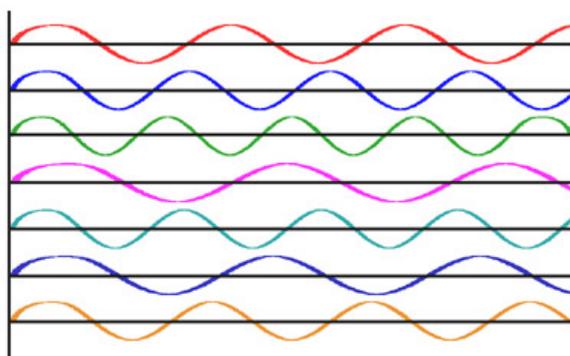


Figura 7. Ondas de radiación óptica incoherentes

La figura 8 ilustra las ondas dentro de un haz Láser altamente colimado. Todas las ondas individuales están en fase una con otra en cada punto. La coherencia es el término usado para describir la propiedad de fase de las ondas de radiación óptica del haz.

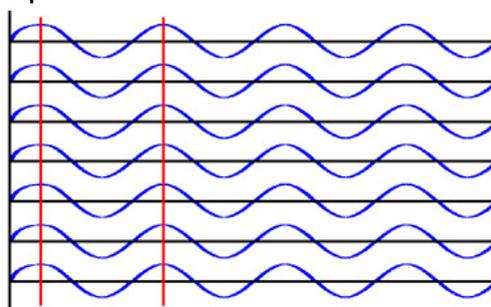


Figura 8. Ondas de radiación óptica coherentes

Un haz Láser no puede ser perfectamente monocromático ni direccional, tampoco perfectamente coherente, pero aún así es más coherente que otras fuentes de radiación óptica.

Se usan una serie de técnicas para mejorar en gran medida la coherencia de muchos tipos de Láseres. La coherencia es la propiedad mas fundamental de un haz Láser y lo distingue de otras fuentes de luz. Así un Láser puede ser definido como una fuente de radiación óptica coherente. La gran importancia de la coherencia no puede ser entendida hasta que se introduzcan otros conceptos, pero la evidencia puede ser fácilmente observada.

En la figura 9, el haz de un dispositivo Láser de baja potencia incide sobre una superficie áspera, como papel o madera, y se refleja en todas direcciones. Una porción alcanza el ojo de un observador situado a varios metros. El observador verá una mancha brillante que parece ser granulada con muchos puntos oscuros y brillantes. Esta apariencia granulada llamada "speckle" es característica de la radiación óptica coherente y es causada por el proceso de interferencia.

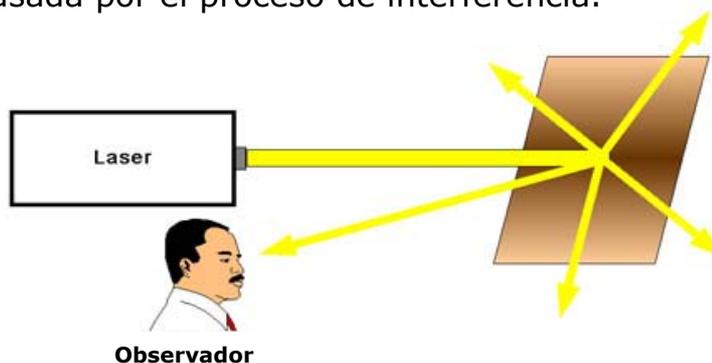


Figura 9. Observando "speckle" de un Láser

Emisión y absorción de radiación óptica

Un Láser produce radiación óptica coherente a través del proceso de emisión estimulada. Es necesaria una breve discusión de la interacción de la radiación óptica con los átomos para introducir este concepto.

Niveles de energía en átomos

Un átomo es la partícula más pequeña de un elemento que mantiene las características de ese elemento. Consiste de un núcleo positivo rodeado por una "nube" de electrones. Todos los átomos neutros de un elemento tienen el mismo número de cargas positivas (protones) en el núcleo y cargas negativas (electrones) en la nube. El contenido de energía de los átomos de un tipo particular varía dependiendo de las energías de los electrones en la nube.

Cada tipo de átomo puede contener solo ciertas cantidades de energía. Cuando un átomo contiene la cantidad más baja de energía que está disponible, se dice que está en el estado base o "ground".

Si el átomo contiene energía adicional sobre este estado base, se dice que está en estado excitado. La figura 10 es un diagrama simplificado de tres niveles de energía. Este átomo puede contener tres cantidades distintas de energía y no otras. Si el átomo tiene un contenido de energía E_1 , está en el estado base y es incapaz de liberar energía. Si contiene energía E_2 o E_3 , está en estado excitado y puede liberar este exceso de energía, por ello cayendo al nivel de más baja energía. Los átomos reales pueden tener cientos o miles de posibles estados de energías posibles. El modelo de tres niveles se usa para efectos de claridad.

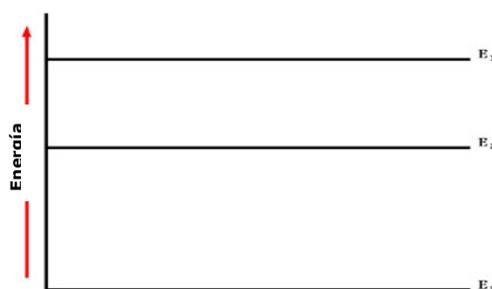


Figura 10. Diagrama de niveles de energía atómicos

Emisión espontánea

Un átomo en estado excitado es inestable y liberará energía espontáneamente y regresará al estado base. Esta liberación puede ocurrir en una transición simple o en una serie de transiciones que involucran niveles intermedios. Por ejemplo, un átomo en el estado E_3 de la figura 10 puede alcanzar el estado base por medio de una transición simple primero desde E_3 a E_1 , o por medio de dos transiciones, primero desde E_3 a E_2 y entonces desde E_2 a E_1 . En cada transición atómica hacia abajo, se libera una cantidad de energía igual a la diferencia del contenido de energía de los dos niveles.

En muchos casos, este exceso de energía aparece como un fotón de luz. Un fotón es un cuanto de energía que tiene características de longitud de onda y de energía, de hecho la longitud de onda del fotón es determinado por su energía. Un fotón de longitud de onda larga (luz roja) posee menos energía que un fotón de longitud de onda más corta (luz azul), figura 11.

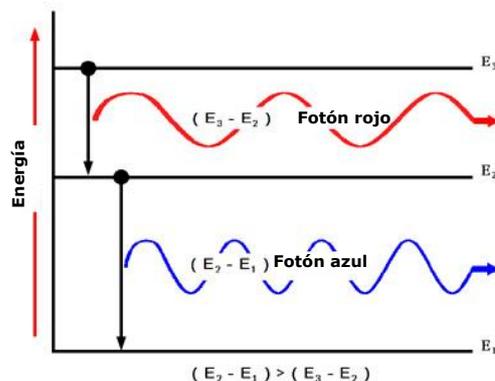


Figura 11. Emisión espontánea

En las fuentes comunes, los átomos individuales liberan fotones aleatoriamente. Ninguna dirección o fase de los fotones resultantes es controlado de ninguna forma y usualmente muchas longitudes de onda están presentes. Este proceso se denomina **emisión espontánea** ya que los átomos emiten luz espontáneamente, muy independientemente de cualquier influencia externa. La luz producida no es monocromática, ni direccional ni coherente.

Emisión estimulada

El haz coherente de un Láser es producido por el proceso de **emisión estimulada**, figura 12. En este caso, el átomo excitado es estimulado por una influencia externa para emitir su energía (fotones) de una forma particular.

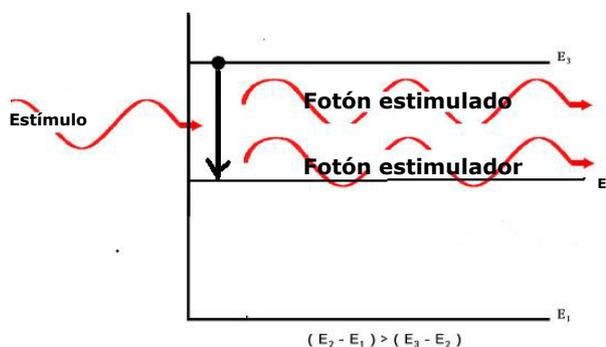


Figura 12. Emisión estimulada

El agente estimulante es un fotón cuya energía $(E_3 - E_2)$ es exactamente igual a la diferencia entre el estado presente del átomo E_3 y algún estado más bajo E_2 . Este fotón estimula al átomo a hacer una transición hacia abajo y emitir, en fase, un fotón idéntico al fotón estimulante. El fotón emitido tiene la misma energía, misma longitud de onda y misma dirección de viaje del fotón estimulante.

Ambos están exactamente en fase. Así la emisión estimulada produce luz que es monocromática, direccional, y coherente. Esta luz aparece como el haz de salida del Láser.

Absorción

La figura 13 ilustra otro proceso que ocurre dentro de un Láser. Aquí un fotón incide sobre un átomo en el estado E_2 y es absorbido por ese átomo. El fotón cesa de existir y su energía aparece como energía incrementada en el átomo, el cual se mueve al nivel E_3 . El proceso de absorción remueve energía desde el haz Láser y reduce su salida.

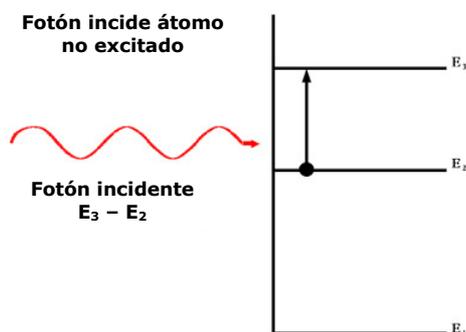


Figura 13. Absorción

Inversión de población

Para que un Láser produzca una salida, se debe producir más luz por emisión estimulada que la que se pierde por absorción. Para que este proceso ocurra, más átomos deben estar en el nivel E_3 que en el nivel E_2 , lo cual no ocurre bajo circunstancias normales. En una gran colección de átomos a cualquier temperatura T , la mayoría de los átomos estarán en el nivel base en un instante dado, y la población de cada estado de energía más alto será menor que la de cualquier estado de energía menor. Esto se llama distribución normal de población. Por ejemplo, a temperatura ambiente si hay N_0 átomos en el estado base del Neón (Láser HeNe) hay solo $10^{-33}N_0$ átomos en el primer estado excitado, aún menos en el segundo estado excitado y así los demás. La población de los niveles de energía ascendentes decrece exponencialmente.

Una **inversión de población** existe cuando más átomos están en el estado excitado que en uno más bajo. El estado más bajo puede ser el estado base, pero puede ser también un estado excitado de menor energía.

Los Láseres pueden producir luz coherente solo si se presenta la inversión de población. Una inversión de población se logra solo a través de excitación externa de la población atómica.

Elementos de un dispositivo Láser

La figura 14 muestra los 4 elementos necesarios en los Láseres para producir luz coherente por emisión estimulada de radiación.

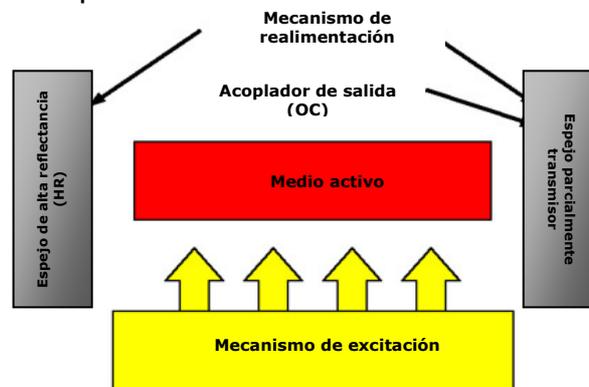


Figura14. Elementos de un Láser

Medio activo

El **medio activo** es una colección de átomos o moléculas que se pueden excitar a un estado de población invertida. Los dos estados escogidos para la transición de Láser tienen ciertas características. Los átomos excitados deben permanecer por un tiempo relativamente largo en alta energía para proveer fotones emitidos por emisión estimulada que por emisión espontánea. Debe haber un método de bombeo para elevar átomos del estado base a estados altamente poblados en altas energías.

El medio activo se considera un amplificador óptico ya que un haz coherente que logre entrar al medio activo es amplificado por emisión estimulada hasta que el haz incrementado alcance el otro extremo del medio activo. Esto es el medio activo brinda ganancia óptica.

El medio activo puede ser un gas, un líquido, un sólido cristalino o una unión semiconductor. Un cristal de rubí fue el medio activo del primer Láser, inventado por Theodore Maiman en Hughes Laboratories en 1960. El medio líquido en Láseres sintonizables consiste de ciertos tintes disueltos en alcohol etílico o metílico. Otros medios son muchos tipos de gases y mezclas de gases como los que contienen una mezcla de Helio y Neón o dióxido de carbono son ejemplos comunes.

Una unión semiconductor compuesta de Galio Arsénico o Fósforo Galio Arsénico son otros ejemplos para diodos Láser.

Mecanismos de excitación

El **mecanismo de excitación** es una fuente de energía que estimula a los átomos en el medio activo desde un nivel de energía bajo a uno más alto para crear inversión de población. En un Láser de gas este es un flujo de corriente eléctrica por el medio. En Láseres de estado sólido y líquidos se emplea bombeo óptico por medio de una lámpara de destellos conteniendo gas Xenón o utilizando diodos Láser.

Mecanismos de realimentación

El **mecanismo de realimentación** retorna una porción de la luz coherente al medio activo para posterior amplificación por emisión estimulada. La cantidad de luz coherente producida depende del grado de inversión de población y la fuerza de la señal estimulante. El mecanismo consiste de espejos a cada lado del medio activo y alineado de tal forma que refleje el haz coherente y de regreso al medio activo.

Acoplador de salida

El **acoplador de salida** permite que una porción del haz Láser contenido entre los dos espejos deje el Láser como haz coherente. Uno de los espejos permite que algo de luz se transmita a la longitud de onda del Láser. La fracción que se escapa varía con el tipo de Láser, desde menos de 1 % para Láser HeNe a más de 80 % para Láseres de estado sólido.

Acción Láser

Cuando se activa la excitación, fluye energía al medio activo y se crea inversión de población. Algunos fotones se emiten incoherentemente en direcciones aleatorias y se escapan del medio pero los que viajen a lo largo del eje producen emisión estimulada, figura 15. El haz producido se refleja entre los espejos por el medio activo y una porción deja el acoplador de salida como el haz Láser.

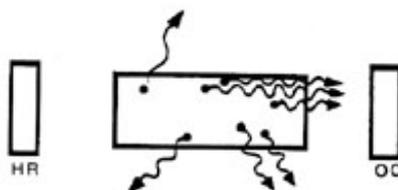


Figura 15. Inicio del efecto en un Láser

Tipos de Láseres

Los Láseres se clasifican de acuerdo al medio activo, el mecanismo de excitación y duración de la salida. Aquí se utiliza la clasificación por medio activo pero puede ser por Láseres pulsantes o CW o con bombeo eléctrico y óptico.

Láser de gas

Una gran familia de Láseres utiliza un gas o mezcla de gases como medio activo. La excitación se logra por un flujo de corriente eléctrica por el gas. Algunos operan en modo de pulsos o CW.

El tipo más popular es el HeNe, una mezcla de helio (He) y neón (Ne) según ilustra la figura 16, que se contiene a baja presión dentro de un tubo sellado para plasma. La excitación es una descarga de corriente directa por el gas que bombea átomos a estado excitado.

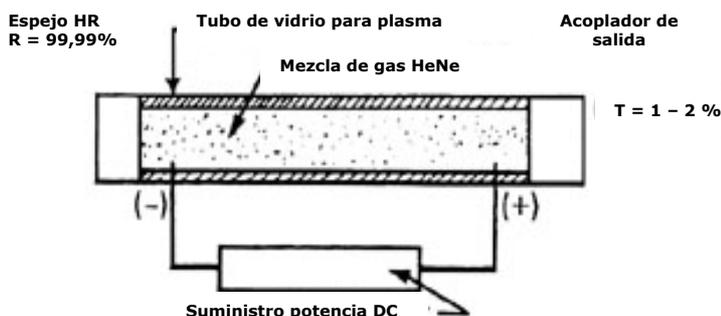


Figura 16. Láser HeNe

La energía de los átomos de helio excitados se transfiere a los de neón y estos sufren transiciones a un nivel de energía más bajos que provoca el Láser. La realimentación son dos espejos en los extremos del tubo. Uno es el acoplador de salida, que transmite 1 - 2 % en un haz CW (continuo).

Láser de sólido cristalino y vidrio

Esta familia de Láseres utiliza materiales de vidrio o sólido cristalino, como ejemplo el rubí y neodimio. El rubí es óxido de aluminio cristalino donde algunos átomos de aluminio del arreglo se reemplazan por iones de cromo que son los elementos activos.

El Granate Aluminio Itrio (YAG - Yttrium aluminum garnet) es el cristal base de los Láseres Nd:YAG, a veces el aluminio se reemplaza por neodimio triplemente ionizado (Nd^{3+}), un elemento de tierra rara. El vidrio también se usa como base para estos Láseres de Neodimio.

La figura 17 muestra los componentes de un Láser CW Nd:YAG. El medio activo es un cilindro de cristal con extremos paralelos pulidos y con recubrimiento AR para reducir pérdidas. El mecanismo de excitación es una lámpara de filamento de tungsteno en AC o una lámpara de arco de descarga de Kriptón para operación CW. Los espejos se colocan separados del medio. Láseres pulsantes Nd:YAG tienen el mismo diseño excepto que se usa una lámpara de destellos de xenón y suministro pulsante o se usan diodos Láser en pulsos.

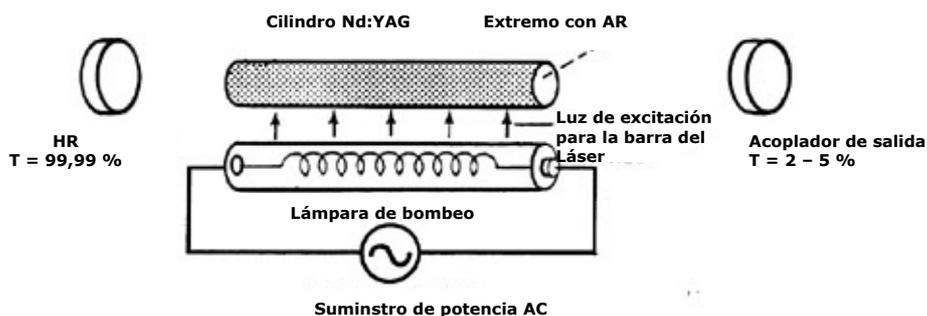


Figura 17. Láser CW Nd:YAG

Láser líquido

Usan una solución de tintes complejos como medio activo que son moléculas orgánicas grandes, con gran peso molecular, como son rhodamine 6G y sodio fluorescente. El tinte se disuelve en un solvente orgánico como alcohol metílico. Así se tiene un líquido como medio activo. La figura 18 muestra un diseño típico.

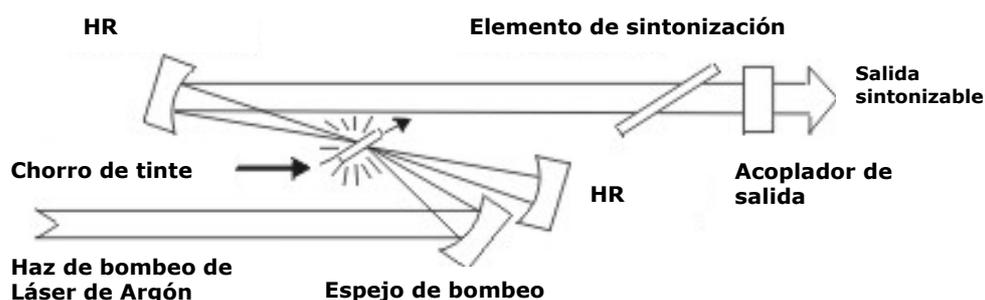


Figura 18. Láser líquido de tinte

El bombeo es un Láser de gas argón en el azul o verde enfocado en una pequeña mancha por donde fluye un chorro del tinte. Se logra sintonización al ajustar el elemento de sintonización dentro de la cavidad y cambiando el tinte. La salida q-monocromática se ajusta desde UV a NIR en pulsos o CW. Estos se usan en espectroscopía donde la sintonización es importante.

Láser semiconductor (diodo)

El medio activo es la unión de semiconductores como Arsenuro de Galio (GaAs) con materiales tipo p (deficiencia de electrones que forman huecos que pueden aceptar electrones) y tipo n (suministro de electrones como portadores de corriente). Dos tabletas tipo p y tipo n se juntan para formar una unión pn. Al fluir una corriente eléctrica por la unión, los electrones se recombinan con los huecos y se libera energía que parece como la de un LED en el visible o en el NIR.

La figura 19 muestra la construcción de un diodo Láser que se basa en un cristal rectangular de uniones semiconductoras (de cerca de 100 μm de largo). Las caras de los lados están recortadas a lo largo de los planos del cristal para formar las caras paralelas del mecanismo de realimentación. El flujo de corriente es el mecanismo de excitación. Comúnmente emiten en el NIR y porciones del visible.

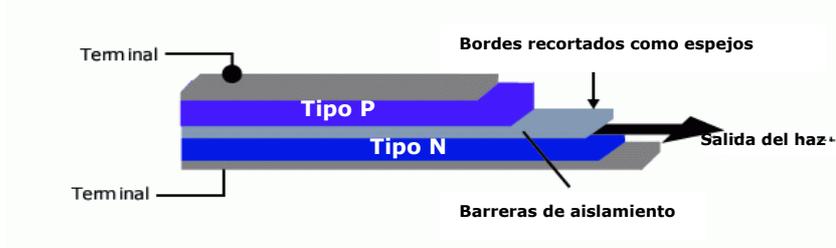


Figura 19. Láser semiconductor

Bibliografía recomendada

- M. Young, Optics & Lasers, Springer, 2000.
- M. Csele, Fundamentals of Light sources and Lasers, Wiley, 2004.
- T. Petruzzellis, Optoelectronics, fiber optics and Laser cookbook, 1997.
- S. Stenholm, Foundations of Laser spectroscopy, Dover, 2005
- L. D. Marín, Introducción al DWDM, Curso de extensión, Universidad de Costa Rica, 2002.