

A MEDIO SIGLO DE LA CONSTRUCCIÓN DEL PRIMER LÁSER

L. HERNÁNDEZ

Facultad de Física, Universidad de La Habana, Cuba. Colina Universitaria, 10400, La Habana, Cuba; luisman@fisica.uh.cu

A 50 años de la primera construcción de un láser de rubí por T. H. Maiman de la Hughes Aircraft Company, se presenta un breve bosquejo histórico de las ideas que condujeron a su creación. Se expone un preámbulo físico sobre el funcionamiento del láser para comprender como trabaja el láser de rubí. Se esboza la importancia que tiene la tecnología láser en el presente y futuro de nuestras vidas.

This paper remembers the 50 years of the first ruby laser which was built by T. H. Maiman. I shortly introduce the history of the main physical ideas resulting in its creation. In particular, I explain how a laser works, with emphasis in a ruby laser. I finally explain the practical importance of lasers in daily life, and its probable future uses.

INTRODUCCIÓN HISTÓRICA

En mayo de 1960 T. H. Maiman de la Hughes Aircraft Company construyó el primer láser usando un cristal de rubí. El inmediatamente envió un breve reporte a la revista *Physical Review Letter* pero se lo rechazaron argumentando que existía una saturación de artículos relacionados con los máseres (que emiten microondas), los antecesores de los láseres. Maiman no se amilanó y lo envió a *Nature* y fue publicado en agosto de 1960[1]. Hoy esa revista lo reporta como uno de sus mejores resultados en el siglo XX.

Lo que descubrió Maiman antes de todos, es que se necesita un umbral de energía para lograr la emisión láser². Si no se alcanza ese valor, el rubí emite un destello de luz roja fluorescente, que no posee las características de la luz láser. Hoy se dice que mientras la ganancia no supera las pérdidas, no hay radiación láser.

La palabra láser es acrónimo inglés que significa “light amplification by stimulated emission of radiation (amplificación de la luz por la emisión estimulada de la radiación)”, es decir, un dispositivo opto-electrónico que se basa en el principio cuántico de la emisión estimulada para la amplificación de luz.

En 1916, Albert Einstein estableció los fundamentos cuánticos para el desarrollo de los láseres y de los máseres, utilizando la ley de radiación de Max Planck basada en los conceptos de emisión espontánea e inducida de la radiación.

En 1928 Rudolf Landenburg reportó haber obtenido la primera evidencia del fenómeno de emisión estimulada de radiación, aunque no pasó de ser una curiosidad de laboratorio. La teoría fue olvidada hasta después de la Segunda Guerra Mundial, cuando fue demostrada definitivamente por Willis Eugene Lamb y R.C. Rutherford.

En 1953, Charles H. Townes[3] y los estudiantes de postgrado James P. Gordon y Herbert J. Zeiger construyeron el primer máser, un dispositivo que funcionaba con los mismos principios físicos que el láser pero que produce un haz coherente de microondas. El máser de Townes era incapaz de funcionar en régimen continuo. Nikolái Bázov y Aleksander Prójorov de la Unión Soviética, trabajaron independientemente en el oscilador cuántico y resolvieron el problema de obtener un máser de salida de luz continua, utilizando sistemas con más de dos niveles de energía.

Townes, Bázov y Prójorov compartieron el Premio Nobel de Física en 1964 por “los trabajos fundamentales en el campo de la electrónica cuántica”, los cuales condujeron a la construcción de osciladores y amplificadores basados en los principios de los máseres y láseres.

PRINCIPIO FÍSICO DE FUNCIONAMIENTO DEL LÁSER

Las fuentes ordinarias de luz generan la radiación electromagnética por calentamiento de las sustancias, incluso aquellas que se llaman “tubos de luz fría”, lo que trae consigo una señal totalmente ruidosa. Esto significa que la luz emerge en paquetes de ondas, separados unos de otros que se refuerzan o se cancela de manera aleatoria, provocando que cada frente de onda varíe de punto a punto en el espacio y que cambie en cada instante. Por otra parte, la mayoría de las fuentes de luz son policromáticas, es decir, emiten en amplio diapason de longitudes de onda, que corresponden a diferentes colores, que sumadas todas originan la luz blanca. Esto hace que las fuentes de luz ordinarias no puedan ser usadas como portadoras de información, a diferencia de las ondas electromagnéticas de radio o microonda que se generan por osciladores eléctricos.

Otra limitación importante de las fuentes de luz ordinarias es su baja intensidad. Ninguna sustancia puede emitir más energía que un perfecto radiador, o cuerpo negro, cuya ley fue de-

rivada por Max Planck. La superficie del Sol, por ejemplo, se comporta como un radiador perfecto emitiendo a 6000 °C. La radiación total del Sol, en todo el intervalo de longitudes de onda, es de 7 kW/cm² y ninguna otra sustancia alcanza tal valor. Aunque parezca elevada esta densidad de energía, realmente no es mucho si se considera el ancho espectral emitido. El ancho espectral de la luz es del orden de 10¹³ Hz (~ diez millones de MHz), en cambio el ancho medio de un canal de radio es de apenas unos pocos MHz y puede transmitir con una potencia de 500 kW.

El láser es una fuente de luz completamente diferente a las ordinarias: la radiación luminosa emitida tiene una alta densidad de energía, su rayo es muy direccional, y además es monocromático. Resumiendo, la luz láser es intensa, direccional y monocromática.

EMISIÓN ESTIMULADA

La emisión estimulada es la base física de la operación de los láseres y su teoría fue desarrollada por Einstein. La emisión estimulada es el proceso inverso de la absorción de la radiación electromagnética. Cuando un fotón es absorbido por un átomo, la energía del fotón se convierte en energía interna del átomo, siendo excitado a un estado cuántico superior, es decir pasa del estado energético E_1 al estado superior E_2 (ver figura 1). El átomo en este estado E_2 , no puede permanecer indefinidamente, porque posee más energía que la que necesita, y entonces regresa al estado anterior E_1 emitiendo espontáneamente un fotón. Durante el período en el cual el átomo se encuentra aún en el estado excitado E_2 , este puede ser estimulado a emitir el fotón si incide sobre el átomo un fotón de energía $h\nu = E_2 - E_1$. Como resultado, el fotón incidente (o la onda) es amplificado después de interactuar con el átomo. Inicialmente se tenía un fotón y ahora son dos, pero lo más relevante es que ambos poseen la misma frecuencia, la misma dirección y están en fase. Este fenómeno es el fundamento de la operación de los láseres.

MEDIO ACTIVO

El problema fundamental en diseñar un láser es preparar un “medio activo” en el cual la mayoría de los átomos se encuentran en el estado excitado E_2 , tal que la onda electromagnética (o fotones) de adecuada frecuencia pase a través del medio provocando una emisión estimulada de fotones en cascada. Claro que al pasar la onda electromagnética por el medio, esta también puede ser absorbida, pero si hay muchos más átomos con nivel de energía E_2 que con el nivel E_1 , entonces predomina la emisión estimulada por encima de la absorción. Para excitar los átomos es necesario entregarle energía al sistema, que puede ser en forma de radiación electromagnética o un simple campo eléctrico y a esto se le llama bombeo del medio activo.

CAVIDAD RESONANTE

Un vez que se logra la inversión de la población, es decir, que muchos más átomos se encuentran en el estado E_2 que en el estado E_1 , el medio está activado y se coloca en una especie de caja entre dos superficies altamente reflectoras, un resonador óptico tipo Fabry-Perot. Entonces una onda que comienza

por ejemplo en una de las paredes de la caja irá creciendo en amplitud hasta que alcanza la otra pared y se refleja regresando hacia donde se encuentran los átomos excitados. Inevitablemente hay muchas pérdidas por reflexión en las paredes de las superficies relectoras, fotones que no excitan, etc. Si la amplificación por la emisión estimulada es mucho mayor que todas las pérdidas, se produce la radiación láser.

La figura 2 esquematiza el proceso anteriormente descrito. Allí se muestra un resonador óptico con dos superficies altamente reflectores, aunque la de la derecha permite la transmisión de la luz. Inicialmente en (a) los átomos, representados por los puntos negros, están en su estado básico. En (b) se le ha suministrado energía al sistema logrando la inversión de población, mas átomos en el estado E_2 que en el estado E_1 . Sin embargo la emisión de fotones es espontánea (flechas negras). El fenómeno de cascada comienza en (c) cuando un átomo excitado emite espontáneamente un fotón (flechas grises) paralelo al eje del resonador, los fotones en otras dirección no contribuyen a la amplificación y se consideran como pérdidas. El fotón inicial emitido a lo largo del eje estimula a otro átomo y contribuye con un segundo fotón. Este proceso continúa en (d) y (e) en la medida que los fotones sufren múltiples reflexiones. Cuando la amplificación supera las pérdidas, se produce la radiación láser y la luz atraviesa la superficie reflectora de la derecha

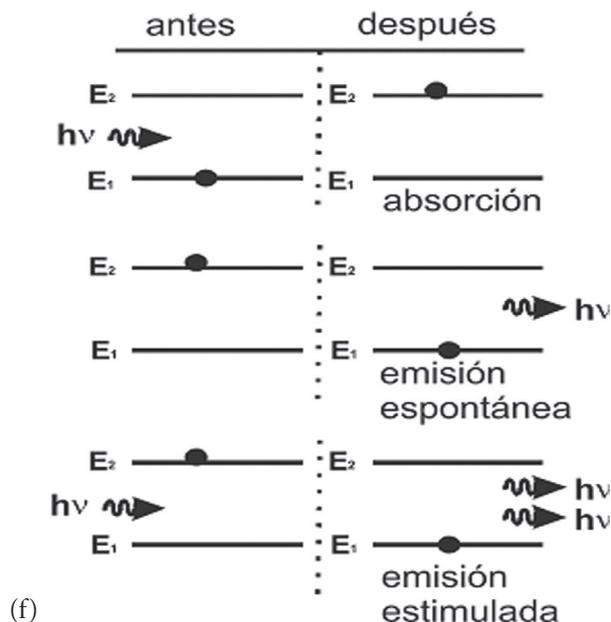


Figura 1. Diagrama de los procesos de absorción, emisión espontánea y emisión estimulada de la radiación electromagnética

Las dimensiones de los resonadores electrónicos para amplificar las ondas de radio o microondas no presentan retos tecnológicos, en cambio un resonador óptico para amplificar las longitudes de onda de luz si requiere de un desafío debido a las dimensiones del orden de las centenas de nanómetros. Ya que la onda que se forma entre los espejos es estacionaria, el problema se resuelve construyendo un resonador con dimensiones miles de veces la longitud de onda de emisión pero que favorece sólo un modo normal de vibración. La cavidad resonante es un

etalón Fabry-Perot que actúa para amplificar la onda, convirtiendo todo el sistema en un oscilador y, por consiguiente, en un generador de luz.

MODOS NORMALES DE VIBRACIÓN

Las ondas que se propagan dentro de la cavidad adquieren una configuración de onda estacionaria determinada por la separación L entre los espejos que conforman el etalón. La cavidad resuena cuando hay un número entero N de semilongitudes de onda, cubriendo la región entre los espejos. El objetivo es que haya un nodo en cada espejo y esto ocurre cuando: $N = L/(\frac{1}{2}\lambda)$, donde, $\lambda = \lambda_0/n$, λ_0 es la longitud de onda en el vacío y n es el índice de refracción del medio.

La frecuencia de cada modo viene dada por $\nu_N = NV/2L$ donde V es la velocidad de fase de la onda luminosa en el medio activo. Por consiguiente, hay un número infinito de posibles modos de oscilación longitudinales en la cavidad. Los modos consecutivos están separados por una diferencia constante:

$$\nu_{N+1} - \nu_N = \Delta\nu = \frac{V}{2L} = \frac{1}{T} \quad (1)$$

Supóngase por ejemplo, que la distancia entre los espejos es de 1 m, típico en algunos láseres de He-Ne, entonces el ancho entre los modos toma el valor de $\Delta\nu = 150$ MHz. Los modos resonantes de la cavidad son considerablemente más estrechos en frecuencia que el ancho de banda de la transición atómica. Así, la longitud de la cavidad se escoge de tal manera que haya uno o más modos vibrando en el resonador y por consiguiente, el rayo emergente está restringido a una región cercana a estas frecuencias. Es decir, la transición radiativa proporciona un rango relativamente ancho de frecuencias entre las cuales la cavidad selecciona y amplifica sólo ciertas bandas estrechas e incluso una sola de tales bandas. Este es el origen de la estrechez de la emisión $\Delta\lambda$ de la luz láser, o sea prácticamente monocromática

Resumiendo (ver figura 3), un láser está constituido por: una fuente de potencia (1), en la figura, el rayo de luz que entrega energía al medio activo (2), para lograr la inversión de población y por una cavidad resonante (3) constituida por dos superficies paralelas altamente reflectoras, que amplifica y monocromatiza la radiación.

La luz láser es extremadamente direccional, muy intensa, esencialmente monocromática y por encima de todo, coherente. La luz es direccional porque solamente se amplifica la que se propaga y refleja a lo largo del eje del resonador óptico. Es decir, las ondas emitidas son planas y por tanto poseen una gran coherencia espacial. Al sustentarse en la emisión estimulada, la onda emitida es monocromática y tiene una gran coherencia temporal. Además, el resonador amplifica la radiación alcanzándose una gran intensidad.

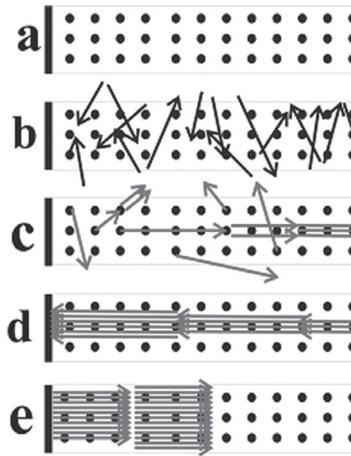


Figura 2. Resonador óptico

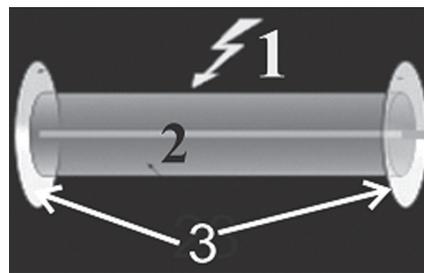


Figura 3. Partes constitutivas de un láser

EL LÁSER DE RUBÍ DE MAIMAN

El primer láser fue construido en base a un cristal de rubí. El rubí es óxido de aluminio en el cual unos pocos átomos de aluminio son sustituidos por átomos de cromo y mientras más cromo, su color es más fuerte. Maiman usó un rubí que contenía 0.05% de cromo⁴, de color rosa pastel y su color es consecuencia que los átomos de Cr en el cristal absorben, en anchas bandas, la luz en el verde, en el amarillo y también el ultravioleta, dejando pasar solamente la luz en el rojo y el azul.

La luz absorbida provoca que los átomos de cromo realicen transiciones a niveles excitados. La energía es cedida en dos pasos (ver figura 4), uno inicial en donde se entrega la energía a la red cristalina realizando una transición a un estado menos energético el cual es un nivel metaestable, es decir, tiene un tiempo de permanencia en ese estado relativamente alto, $\sim 10^{-3} - 10^{-4}$ s que es muy elevado en comparación con la emisión espontánea, 10^{-9} s. De tal manera que la inversión de población se logra entre el nivel metaestable y el nivel básico, El segundo paso, es la transición entre estos dos niveles, emitiendo fotones de $\lambda = 694.3$ nm, los cuales dan la característica de fluorescencia roja típica de los rubíes. Los primeros fotones emitidos espontáneamente desde el nivel metaestable, estimulan los átomos excitados de Cr a realizar las transiciones hacia el nivel básico, mucho más rápido que si lo emitieran espontáneamente. El resultado es una cascada de fotones en emisión estimulada con $\lambda = 694.3$ nm.

La figura 5 muestra una foto del primer láser de rubí construido por T. H. Maiman. El cristal de rubí fue maquinado en

forma de barra cilíndrica y sus extremos fueron pulidos hasta alcanzar una gran reflexión óptica. Sus superficies deben ser perfectamente paralelas de manera de construir en el propio cristal la cavidad resonante óptica. La barra fue situada dentro de un tubo de luz flash que es la fuente de energía para el bombeo óptico. Un esquema se muestra en figura 6. La emisión láser del primer dispositivo era en forma de pulsos bien cortos y se tenía que refrigerar la barra porque el calor generado por la luz flash era muy elevado. Los láseres en base a cristales, de estado sólido, generalmente trabajan en forma de pulsos pero son los que emiten con mayor intensidad.

CONCLUSIONES

Las motivaciones iniciales para la construcción de los láseres estaban dirigidas a las ramas de las comunicaciones, transmitir en el ancho de banda de la luz, que es millones de veces mayor que el de las microondas, ilusionaba a los ingenieros a lograr miles de canales de TV, que en esos momentos recién comenzaba a desarrollarse. Para esa época, el surgimiento del láser fue considerado por Maiman como una clásica "solución en busca de un problema"; pero su habilidad para dirigir una poderosa fuente de energía de un lugar a otro, pronto abrió un mundo de posibilidades.

Actualmente, las aplicaciones de los láseres son extensas y variadas, se encuentran en todas partes: desde reproductores de DVD y lectores ópticos, pasando por los sistemas de armas, cables de fibra óptica para las comunicaciones y en muchos equipos médicos. Para hoy resultan familiares entre los cubanos las operaciones oftalmológicas con la utilización de láseres.

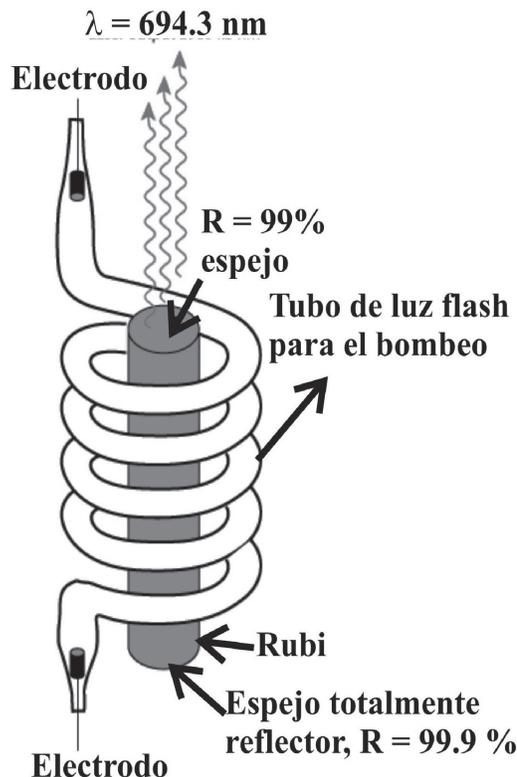


Figura 6. Esquema del láser de rubí

En el presente, el mercado mundial del láser registra entre US\$5.000 y US\$7.000 millones anualmente. La mayor parte de esta cifra corresponde a láseres vendidos a la industria manufacturera para su uso en el procesamiento de materiales, pero otra buena parte del mercado utiliza el láser en sistemas de comunicación y para el almacenamiento de datos.

Con el desarrollo de la nanotecnología, el láser encontrará nuevas aplicaciones en la manipulación de átomos y moléculas. Su uso en la medicina se multiplicará en el despliegue de las proteínas y sobre todo en el tratamiento del cáncer. Con el aumento sostenido de la potencia de los láseres se prevé una amplia utilización, incluso para generar fusión nuclear. El láser también continuará extendiéndose en la rama de astronomía para permitirnos conocer mejor el Universo (o los varios Universos) donde habitamos. En fin, el láser ha tenido un pasado glorioso y un futuro bien prometedor.

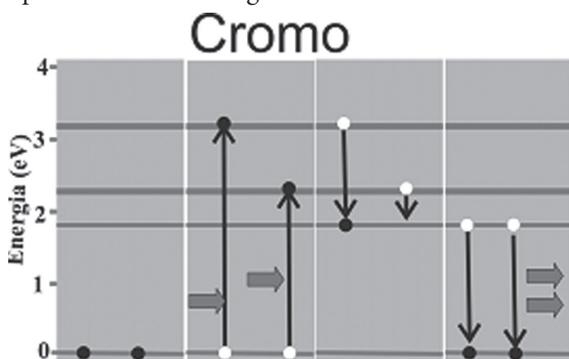


Figura 4. Diagrama energético del cromo

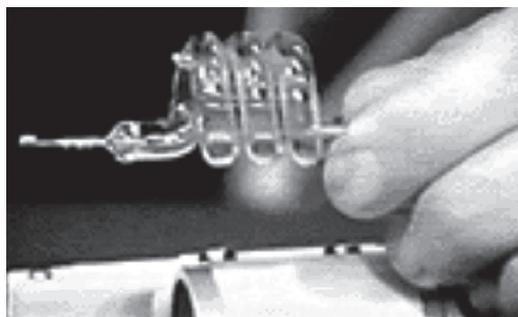


Figura 5 . Primer láser de rubí construido por T.H. Maiman

- [1] Maiman, T.H. "Stimulated Optical Radiation in Ruby". Nature, 187, 493 (1960).
- [2] Maiman, T.H.. The laser odyssey. Laser Press, Blaine, WA (2000).
- [3] Townes C.H., How the laser happened: Adventures of a Scientist. Oxford U. Press, New York (1999).
- [4] Schawlow A.L. "Optical Masers". Scientific American, 204, 52, (1961).