

El camino hacia la luz láser

H.E. Ibarra Villalón^a, O. Pottiez^b and A. Gómez Vieyra^c

^aPosgrado en Física. Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Iztapalapa.
San Rafael Atlixco No. 186, Col. Vicentina, Iztapalapa, 09340, CDMX. México.

e-mail: alm.hugoibarra@gmail.com

^bCentro de Investigaciones en Óptica A.C.

Lomas del Bosque 115, Col. Lomas del Campestre, León Gto. 37150, México.

^cDepartamento de Ciencias Básicas e Ingeniería. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco,
Av. San Pablo No. 180. Col. Reynosa Tamaulipas, 02200, Azcapotzalco, Ciudad de México.

Received 21 November 2017; accepted 6 December 2017

En este trabajo se presenta el desarrollo cronológico de la invención del láser, partiendo desde la propuesta teórica de la emisión estimulada hasta la invención del primer dispositivo láser. Se analizan los trabajos de investigación más relevantes y se discuten las dificultades que se tuvieron que afrontar e inclusive las disputas que surgieron al momento de registrar la patente del láser. También, se estudian los principios físicos que hacen posible la emisión del láser, describiendo la inversión de población en un sistema de tres niveles de energía a partir de un modelo matemático y la arquitectura que debe de tener una cavidad láser.

Descriptores: Historia del láser; física de láseres.

The present work is a review of the chronological development of the laser invention, starting from the theoretical proposal of stimulated emission to the invention of the first laser device. We present the most relevant research papers and discuss the difficulties that had to be faced, including the disputes that occurred at the time of registering the laser patent. Besides, the theoretical principles that make possible the emission of the laser are studied, describing the population inversion in a system of three levels of energy from a mathematical model and the architecture that must have a laser linear cavity.

Keywords: History of laser; laser physics.

PACS: 42.55.-f; 42.55.Ah.

1. Introducción

Los láseres son dispositivos que han revolucionado la vida cotidiana debido a las innumerables aplicaciones que han sido desarrolladas, en campos como la medicina, las telecomunicaciones, en la industria, entre otros. Por ello es de gran relevancia conocer los antecedentes que dieron origen a la invención del láser.

La invención del láser no fue una mera casualidad, fue producto de aproximadamente 40 años de investigaciones y su origen se remonta a una de las grandes ideas que propuso el físico Albert Einstein: el efecto de emisión estimulada. Debido a la originalidad de la idea planteada por este científico, la invención del láser fue cuestión de tiempo; el rumbo estaba marcado para que los físicos experimentales pudieran comprobar la existencia de la emisión estimulada.

La palabra láser (LASER) es un acrónimo de las siglas en inglés “*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*” (Amplificación de Luz por Emisión Estimulada de Radiación), como su nombre lo dice, se necesita amplificar la luz; esto se logró con dos descubrimientos: el primero fue el proceso de inversión de población en un medio activo y el segundo con la configuración adecuada de una cavidad resonadora que generó un haz de fotones monocromáticos y altamente coherentes. El estudio de la inversión de población se incluye en este trabajo, en donde a partir de un enfoque matemático se comprueba la presencia de este efecto en un sistema de tres niveles de energía no degenerados. También

se incluye el estudio del funcionamiento de una cavidad resonadora lineal.

2. Historia de la invención del láser.

La primera investigación que se asoció con el láser es el efecto de emisión estimulada propuesta por Albert Einstein en 1917, consistía en una explicación teórica de cómo los electrones pueden emitir luz a una longitud de onda específica a partir de una intervención externa [1], (Ver Sec. 3).

Los físicos alemanes Rudolf Walter Ladenburg y H. Kopfermann, en 1928 comprobaron experimentalmente la emisión estimulada o también conocida en esa época como absorción negativa [2]. En trabajos posteriores, Landenburg estudió las propiedades del gas Neón al pasar a través de descargas eléctricas [3], no obstante, nunca logró un nivel propicio de descargas eléctricas para provocar emisión estimulada con este gas.

El ruso V. Fabrikant, conocido por sus trabajos sobre la amplificación de la radiación electromagnética [4], en 1940 propuso un formalismo, diferente al de Landenburg, sobre la absorción negativa en un gas [5]: la mayor contribución de este trabajo fue la propuesta del mecanismo de inversión de población, el cual es un principio fundamental para la operación de un láser. Sin embargo, fue hasta 1958 cuando L. Schawlow y C. Townes plantearon la posibilidad de implementar la inversión de población para producir un haz de luz

en el espectro óptico visible e infrarrojo [6]. Para comprender este principio hay que considerar que, en condiciones de equilibrio térmico, la cantidad de átomos por unidad de volumen en estado excitado siempre debe ser menor que la cantidad de átomos en estado base. Cuando se logra la inversión de población se consigue que la cantidad de átomos por unidad de volumen en estado excitado sea mayor que la cantidad de átomos en estado base. Esto es posible, si el tiempo medio que un átomo puede permanecer en estado excitado no es muy pequeño, porque en caso contrario se presentará emisión espontánea.

Hasta este momento en la historia, se había logrado experimentalmente la emisión estimulada y se tenía la idea de inversión de población, únicamente faltaba un aspecto muy importante: lograr amplificar la emisión estimulada. Diferentes grupos de investigación en la década de los 50's trabajaron arduamente en la invención de nuevas técnicas para producir radiación, a partir de un proceso de amplificación de la emisión estimulada, en un principio en la región de microondas del espectro electromagnético. Existiendo tres líneas de desarrollo: la primera fue del físico estadounidense Charles Hard Townes en el Laboratorio de Radiación de la Universidad de Columbia [6–9], la segunda fue del físico estadounidense Joseph Weber de la Universidad de Maryland [10, 11] y finalmente la tercera de los físicos Alexander M. Prokhorov y Nikolai G. Basov del Instituto de Física Lebedev en Moscú [12–15].

Joseph Weber publicó en 1953, en la Universidad de Maryland, una nueva propuesta teórica para obtener la emisión estimulada con un amplificador de microondas [10]. Es importante destacar que él propuso un nuevo método para lograr la inversión de población, asimismo, dio las bases para que la emisión estimulada pueda ser coherente con ondas en fase. Al trabajo realizado por Weber le faltaba la idea de integrar un resonador a su modelo teórico. Debe aclararse que la mejor forma de lograr la inversión de población es con un bombeo óptico, el cual se desarrolló en 1950 por el físico francés Alfred Kastler, basado en técnicas de resonancia ópticas [16].

Por otra parte, Charles H. Townes presentó en una conferencia científica en Washington, D.C. en 1951 [17] la idea de

construir un amplificador de microondas utilizando moléculas de amoníaco, al que se le nombró máser (MASER) por sus siglas en inglés “*Microwaves Amplification by Stimulated Emission of Radiation*”. Años más tarde, con la colaboración de sus estudiantes de doctorado J.P. Gordon y H.J. Zeiger, construyeron el primer MASER en 1954 [7], cabe señalar que este fue su segundo prototipo.

Por su parte, los rusos Prokhorov y Basov estaban muy interesados en la espectroscopía molecular, en su enfoque hacia la investigación del láser trataron de controlar la población de varios niveles de energía para mejorar la sensibilidad en sus estudios de espectroscopía. En 1954 publicaron su trabajo [12] logrando dos aspectos muy importantes: el primero fue un estudio de cómo separar las moléculas con diferente energía en un sistema de haz molecular. La segunda fue que la amplificación podría ocurrir en un grupo específico de moléculas excitadas. Cabe mencionar que Basov, para su tesis de doctorado, construyó el primer máser soviético tan solo unos meses después que el máser de Townes, aclarando que ambos trabajaron independientemente.

El máser de amoníaco propuesto por Townes, Gordon y Zeiger, estaba basado en un sistema de dos niveles de energía, en donde existía una separación física entre las moléculas excitadas y las que están en el estado más bajo de energía. Para que ocurriera la inversión de población, se necesita que las moléculas en estado excitado bajen al nivel más bajo por medio de la emisión estimulada. No obstante, el máser no puede ser explicado con un sistema de dos niveles de energía, sino más bien un sistema de tres niveles, el cual fue propuesto por primera vez por Basov y Prokhorov con los dos casos siguientes [13]:

- Excitar moléculas del estado base, con ayuda de un bombeo óptico producido por una fuente de radiación externa, para que éstas pasen al nivel más energético (Fig. 1.a). Esto provoca que existan una mayor cantidad de moléculas en el nivel de energía más alto, en comparación de un nivel de energía intermedio; este último muy cercano al nivel de energía más alto. Con el nivel más energético y el nivel intermedio se produ-

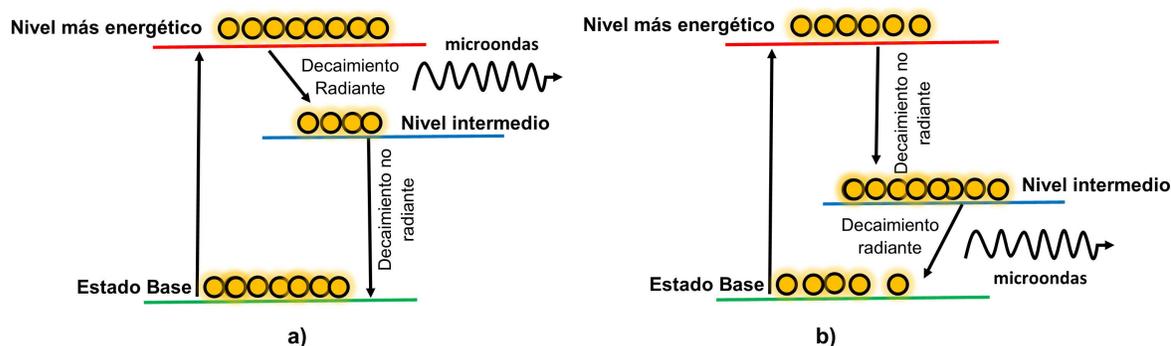


FIGURA 1. Propuesta del funcionamiento del MASER a partir de un sistema de 3 niveles de energía. a) Con la inversión de población entre el estado más energético y un nivel intermedio. b) Con la inversión de población entre el nivel intermedio y el estado base.

cirá la inversión de población, sin la necesidad de incrementar la razón de cambio del número de moléculas excitadas del estado base. Además, entre el nivel más energético y el nivel intermedio es donde ocurren las transiciones radiantes, generando un haz de microondas a partir de la emisión estimulada.

- Las condiciones son las mismas que el caso anterior, solo que en este caso se propone que la inversión de población se dé entre el nivel intermedio y el estado base (Fig. 1.b); en este caso el nivel intermedio es cercano al estado base.

Debido a que los rusos Basov y Prokhorov trabajaron sin conocer la investigación de Townes y éste trabajó sin conocer la investigación de los físicos rusos, se les asignó el premio Nobel a los tres por el principio del MASER-LASER en 1964.

Como se había mencionado, el bombeo óptico fue propuesto por Kastler en 1950, sin embargo, a quien se le da el crédito por perfeccionar y lograr este efecto es al físico estadounidense Robert H. Dicke que introdujo el concepto de superradiancia, el cual es conocido actualmente como bombeo óptico [18]. La idea básica era utilizar pulsos para excitar los átomos en estado base produciendo una inversión de población, logrando así una intensa emisión estimulada. El prototipo fue publicado en su patente *Molecular amplification and generation systems and methods* presentada en 1956 y aprobada en 1958 [19], consistía en un interferómetro Fabry-Perot con dos espejos paralelos, este prototipo fue de gran ayuda, ya que dio a conocer los fundamentos y principios de una cavidad resonante, los cuales, posteriormente, se utilizarían en la invención del láser.

La primera idea de construir un láser fue de Townes junto con Schawlow en 1958 con la publicación *Infrared and Optical MASER* [6]. No obstante, Gordon Gould trabajó a la par sobre estas ideas creando en 1957 un dispositivo láser que usó como medio de amplificación vapor de potasio, de hecho, en este mismo año en sus notas acuñó el término *LASER* por sus siglas en inglés *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, estas notas fueron documentadas ante notario público [20]. Debido a esto, existió una gran disputa por la patente del uso de artefactos que emitieran luz por el mecanismo de emisión estimulada. Primero la solicitó Townes y después Gould peleó por los derechos que a él le correspondía de esta patente [21]. Cabe destacar, que el trabajo de Townes y Schawlow tuvo un gran impacto en las primeras investigaciones del láser, además del peso de su prestigio en la comunidad científica por toda su trayectoria. Mientras que Gould solo tenía notas y muy pocos congresos de mínima circulación que no tuvieron impacto en la comunidad científica [17, 20].

El camino entre el máser y láser no era obvio debido a las diferencias entre las microondas y la luz visible. Una de ellas, es que los fotones que producen la luz visible tienen una energía que es miles de veces mayor que las microondas. En contraparte, su longitud de onda es miles de veces menor.

Sin embargo, se necesitaba otro material activo para alcanzar la inversión de población y la necesidad de una cavidad resonante.

Para construir el primer láser, los laboratorios Bell consideraron como medio activo rubí sintético y óxido de aluminio dopado con cromo. Schawlow consideró al rubí como un buen material para desarrollar el láser, no obstante, en 1959 públicamente valoró al rubí, de acuerdo con sus pruebas, como inadecuado para la fabricación del láser [22]. Mientras tanto, Theodore Maiman trabajó con rubí para implementar un láser; pareciéndole buena la idea de Schawlow, a pesar de que ya se había considerado al rubí como inadecuado.

El 19 de mayo de 1960, Theodore Maiman construyó el primer láser en los laboratorios de investigación de Hughes, en Malibú, California [22]. Este láser fue nombrado como el láser de rubí, consistió en una barra de rubí de aproximadamente un centímetro de diámetro, a la cual se enrolló una lámpara helicoidal de xenón (Fig. 2) y sus extremos fueron recubiertos por una película reflectiva, los cuales funcionaron como espejos. El bombeo óptico fue producido por la lámpara de xenón, al producir destellos de luz muy intensos, que provocan una inversión de población en el sistema, emitiendo fotones que completan un gran número de ciclos reflejándose en los espejos dentro de la cavidad, hasta que el dispositivo emitió pulsos con una longitud de onda centrada en el rojo [21].

Posteriormente se comenzó a trabajar en la invención de láseres con diferente medio de amplificación y sistema de bombeo, así como también diferentes arquitecturas en la cavidad resonante. Uno de los primeros prototipos que implementó como medio de amplificación un gas, fue el láser de Helio-Neón operando en onda continua a 1153 nm desarrollado en 1961 por el físico iraní Javan y sus colaboradores [23]. El funcionamiento de este láser consiste en que el bombeo óptico, por medio de descargas eléctricas, produce que el He se ionice y que gran parte de sus átomos excitados choquen inelásticamente con los átomos de Ne en el estado fundamental, por lo que se les transferirá energía suficiente para que comience el proceso de inversión de población en el Ne. El desarrollo de los láseres de gas continuó en función de las necesidades tecnológicas que se fueron requiriendo, emitiendo

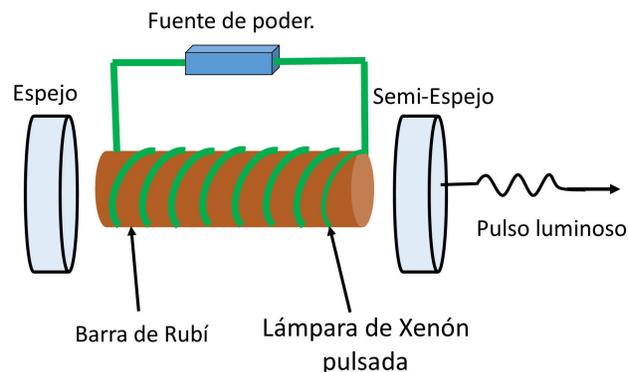


FIGURA 2. Esquema del láser de rubí.

longitudes de onda que van desde el ultravioleta al infrarrojo lejano [24].

La invención del láser de He-Ne, fue aprovechada en 1961 por L. Snitzer, ya que lo utilizó como una fuente de bombeo acoplada a una varilla de vidrio de $305 \mu\text{m}$ dopada con Neodimio trivalente, este medio es similar a una fibra óptica dopada con una tierra rara. Con este sistema se logró que la emisión del láser ya no fuera en onda continua, al emitir un espectro de 30 angstrom de ancho centrados en $1.06 \mu\text{m}$ [25]. Este fue el primer trabajo que dio pie a la generación de nuevos láseres de fibra óptica que emiten en longitudes de onda en el infrarrojo, el medio activo de estos láseres es una fibra dopada con alguna tierra rara (Neodimio, Tulio, Erblio, Iterbio, entre otras) que es bombeada por un diodo láser. Las cavidades resonadoras de los láseres de fibra son lineales, de anillo o en figura de ocho que emiten en onda continua o bien en un régimen pulsado que es activado por mecanismos que incluyen efectos ópticos no-lineales [26].

El láser de rubí y los láseres de fibra óptica entran en la categoría de láseres de estado sólido. Actualmente este tipo de láseres utilizan como medio de amplificación una barra de vidrio o cristal dopada con iones que permiten la existencia de la inversión de población en un sistema de 3 o 4 niveles de energía. Estos láseres se caracterizan por su alta potencia, por ejemplo el láser de Nd:Yag emitiendo a 1060 nm , genera una potencia de más de un kilovatio [27]. En [28, 29] se estudian los principios físicos, así como los medios de amplificación más usuales en los láseres de estado sólido.

Otra línea de investigación que surgió después de la invención del láser de rubí fue los láseres de líquido o también conocidos como láseres orgánicos, en los que un colorante orgánico diluido en una solución es implementado como medio de amplificación. El primer artículo reportado sobre la emisión láser a partir de una solución orgánica fue desarrollado en 1963 por Alex Lempicki y Harold Samelson [30] utilizando como medio activo un quelato orgánico (compuesto formado por un ión metálico y radicales orgánicos) de benzilacetato de europio EuB_3 , cuya emisión fue de 613 nm . Utilizar quelatos como medio activo en el láser era ineficiente, ya que el bombeo óptico, producido por una lampara pulsada, excitaba solo una pequeña parte de los iones que producen la emisión estimulada [31]. Para resolver este problema, en 1966 Peter Sorokin y John Lankard desarrollaron un láser líquido sin utilizar quelatos, ellos utilizaron como medio activo ptalocianina de cloro-aluminio, produciendo una emisión pulsada más eficiente a 755.5 nm [32]. En la referencia [33] se tiene una recopilación del desarrollo de nuevos láseres orgánicos, que surgieron después de estos dos primeros trabajos, al implementar distintas soluciones orgánicas como medio activo.

Por su importancia en la tecnología actual no podemos omitir a los láseres de semiconductor. Al utilizar un semiconductor como medio activo, no se tendrá el mecanismo de inversión de población en un sistema de niveles de energía como se explicó anteriormente, sino un proceso de emisión de fotones a partir del decaimiento de electrones de la ban-

da de conducción hacia agujeros de la banda de valencia del semiconductor. Dentro del desarrollo histórico, es importante mencionar que antes de la invención del láser, los japoneses Y. Watanabe y J. Nishizawa, en abril del 1957, patentaron el máser de semiconductor [34] utilizando al Telurio como medio activo, esta fue la primera vez que se demostró experimentalmente la emisión estimulada en un semiconductor. Uno de los primeros grupos que desarrollaron un láser de semiconductor fue el de Nathan y sus colaboradores en 1963, demostrando la electroluminiscencia del arseniuro de galio a la temperatura de nitrógeno líquido [35]. Para un estudio más detallado en las referencias [36, 37] se analiza el desarrollo cronológico y los principios de operación de los láseres de semiconductor.

3. Principios físicos del láser

En esta sección, se estudiarán los procesos físicos involucrados en el mecanismo de los láseres. Como se mencionó anteriormente, uno de los más importantes es la emisión estimulada, que consiste en la interacción de un átomo en un estado excitado con un fotón (Fig. 3). El fotón provoca una transición radiante del átomo hacia un estado más bajo de energía, por lo que se producirá un nuevo fotón coherente de características iguales al incidente, es decir con la misma dirección, fase, energía, polarización, etc.

Uno de los desafíos a los que se enfrentaron en los trabajos de investigación, previos a la invención del láser, fue encontrar un material que funcionara como medio activo, el cual fuera estimulado con una fuente externa (fuente de bombeo), para poder alcanzar un proceso de inversión de población. La tarea no fue sencilla, ya que en primera instancia se tuvo que explicar por primera vez el efecto de inversión de población en un sistema de niveles de energía.

En la actualidad, se sabe que el efecto de inversión de población se puede generar en sistemas de 3 o 4 niveles de energía. Sin embargo, a continuación, se estudiará un sistema de dos niveles de energía, el cual fue uno de los primeros modelos teóricos para explicar la inversión de población a partir de temperaturas negativas.

Partiendo de un análisis de la mecánica estadística [38], se propone un sistema de dos niveles de energía cercanos y no degenerados en equilibrio termodinámico, ver Fig. 4. El número de partículas por unidad de volumen, en el nivel más alto de energía N_2 , estará en función del número de partículas en el nivel más bajo N_1 , siguiendo la distribución de Boltzmann:

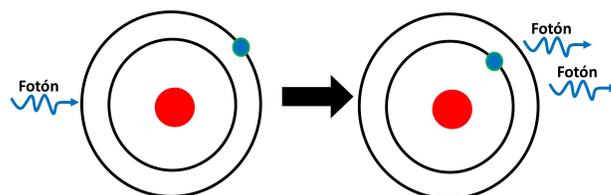


FIGURA 3. Representación del proceso de emisión estimulada.

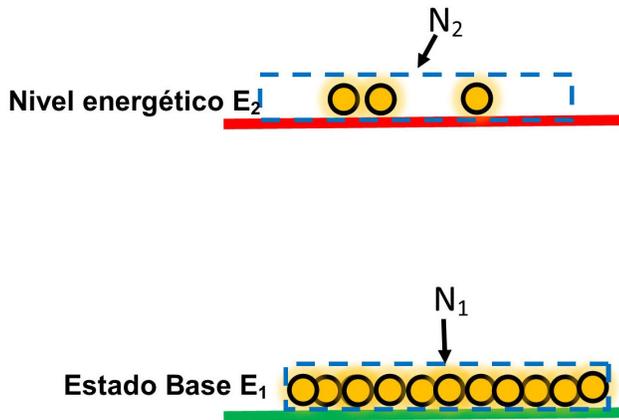


FIGURA 4. Sistema de dos niveles de energía en equilibrio termodinámico.

$$N_2 = N_1 \exp\left[-\frac{E_2 - E_1}{K_B T}\right] = N_1 \exp\left[-\frac{h\nu_0}{K_B T}\right] \quad (1)$$

donde: $E_2 > E_1$ y $E_2 - E_1 = h\nu_0$, ν_0 es la frecuencia de resonancia de la transición entre dos niveles de energía.

El número total de partículas (átomos) por unidad de volumen en el sistema es $N = N_1 + N_2$. En equilibrio termodinámico, el nivel más bajo de energía tendrá una población mayor en comparación del nivel más alto, en este caso, el sistema no emite fotones. Si la temperatura se incrementa, la población en el nivel más alto de energía se incrementará, sin embargo, la población N_2 seguirá siendo menor que la del nivel más bajo N_1 . Si la temperatura es muy alta ($T \rightarrow \infty$), a partir de la Ec.1, se deduce que la población en los dos niveles de energía es la misma $N_1 = N_2$.

Si en el láser, se activa la ganancia óptica a través de la emisión estimulada, el sistema saldrá de su condición de equilibrio termodinámico y en este caso el número de partículas en el nivel más alto de energía (N_2) es mayor que la del nivel más bajo (N_1), alcanzando así la inversión de población.

En general, la inversión de población ocurre cuando un sistema de niveles de energía se sale de su estado de equilibrio, provocando que la cantidad de partículas (átomos) del medio activo que se encuentra en los niveles más altos de energía sea mayor que las partículas en los niveles más bajos de energía. En este caso, la inversión de población no ocurre en un sistema de dos niveles de energía, es necesario un nivel intermedio dando lugar a un sistema de tres niveles de energía, que se describe a continuación.

Un sistema de tres niveles de energía, ver Fig. 5, es un modelo adecuado para el medio de amplificación de un láser. Para este análisis, el sistema tiene tres niveles de energía no degenerados, E_1 , E_2 y E_3 , a los cuales se les asocia las variables, N_1 , N_2 y N_3 , que son el número de partículas por unidad de volumen en cada uno de estos niveles. El bombeo óptico que incide al sistema produce una transición de los átomos del estado base al estado de mayor energía (Nivel 3). Después los átomos sufren un rápido decaimiento no radiante

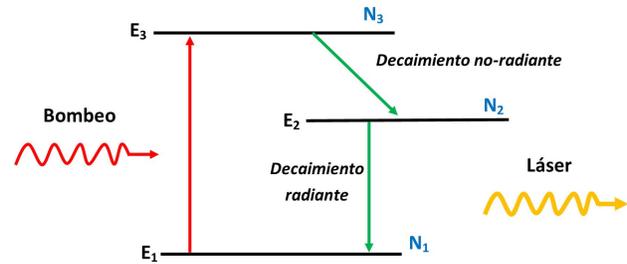


FIGURA 5. Sistema de tres niveles de energía.

hacia el nivel de energía intermedio (Nivel 2), en esta transición, una fracción de la energía se disipa en forma de fonones (vibraciones). Las partículas del estado intermedio sufren una transición al estado base a partir de un decaimiento radiante, esto significa que en esta transición se emitirán fotones a partir de emisión espontánea y emisión estimulada, por lo que es evidente que la inversión de población se dará entre el nivel intermedio y el estado base.

A continuación, se analizará la evolución de la población con respecto al tiempo de cada uno de los niveles de energía [39].

El número de átomos de la población total por unidad de volumen en el sistema está dado por:

$$N = N_1 + N_2 + N_3 \quad (2)$$

La razón de cambio de la población con respecto al tiempo en el nivel de energía superior (nivel 3) está dado por:

$$\frac{dN_3}{dt} = W_p N_1 - T_{32} N_3 \quad (3)$$

donde:

- $W_p = W_{13}$ es la razón de cambio del número de átomos por unidad de tiempo que sufren una transición del estado base al nivel excitado.
- $T_{32} = A_{32} + S_{32}$ es la razón de cambio del número de átomos por unidad de tiempo que sufren una transición espontánea del nivel de energía 3 al nivel de energía 2, A_{32} es la contribución de la transición radiante y S_{32} es la contribución de la transición no radiante.

La Ec. 3 nos da información de cómo va cambiando la población en el nivel de energía 3. El primer término ($W_p N_1$) es la contribución del número de átomos por unidad de tiempo que están llegando del estado base (Nivel 1) y en el caso ideal se desprecia el decaimiento del nivel 3 hacia el estado base. El segundo término $T_{32} N_3$ es la razón de cambio del número de átomos por unidad de tiempo que están decayendo del nivel 3 al nivel intermedio (Nivel 2), imponiendo la condición del caso ideal en donde $S_{32} \gg A_{32}$, es decir, que existe una mayor contribución de transiciones no radiantes en comparación con las transiciones radiantes en el proceso de decaimiento de los átomos del nivel 3 al nivel 2.

La razón de cambio del número de partículas por unidad de tiempo en el nivel de energía intermedio (nivel 2), está dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{dN_2}{dt} = -W_{21}N_2 + T_{32}N_3 - T_{21}N_2 \quad (4)$$

donde:

- $W_{21} = \frac{\pi^2 c^2}{h\omega^3 n_0^2} A_{21} g(\omega) I_1$ es la tasa de cambio de las transiciones de los átomos a partir de emisión estimulada de las partículas del nivel 2 al nivel 1. En esta expresión $A_{21}[1/s]$ es el cambio asociado con las transiciones radiantes, $g(\omega)$ es una función de peso lineal y I_1 es la intensidad de la radiación producida por los fotones que son generados de esta transición a partir de emisión estimulada y emisión espontánea.
- $T_{32} = A_{32} + S_{32}$ es la razón de cambio por unidad de tiempo de las transiciones de partículas que están decauyendo del nivel 3 hacia el nivel 2, asociado a procesos radiantes y no radiantes.
- $T_{21} = A_{21} + S_{21}$ es la razón de cambio por unidad de tiempo de las transiciones espontáneas de las partículas, que pasan del nivel de energía 2 al nivel de energía 1 a través de procesos radiantes $S_{21} \ll A_{21}$.

De la Ec. 4, el primer término $W_{21}N_2$ es asociado con transiciones estimuladas de los átomos del nivel de energía intermedio (nivel 2) al estado base (Nivel 1) a partir de la emisión estimulada, este término representa a una pérdida de población de los átomos en el nivel 2, por lo cual lleva un signo negativo. El segundo término $N_3 T_{32}$ es asociado con las transiciones espontáneas de los átomos, que pasan del nivel 3 al nivel 2, por lo que este término es una contribución de una ganancia de la población hacia el nivel de energía 2, en consecuencia, tiene un signo positivo. El tercer término representa una pérdida en la población debida a la emisión espontánea, que se da en las transiciones del nivel 2 al estado base. En las transiciones radiantes (emisión estimulada y emisión espontánea $A_{21} \gg S_{21}$), del nivel 2 al estado base, ocurre una inversión de población tal que $N_2 > N_1$.

De la misma forma la razón de cambio de la población de átomos en el nivel 1 (estado base) se asocia con la siguiente expresión:

$$\frac{dN_1}{dt} = W_{21}N_2 + T_{21}N_2 - W_p N_1 \quad (5)$$

En la Ec. 5, el primero y el segundo término son la contribución del número de átomos por unidad de tiempo que están asociados con una transición radiante, debido a la emisión estimulada ($W_{21}N_2$) y emisión espontánea ($N_2 T_{21}$), del nivel de energía 2 al nivel de energía 1 (estado base). El tercer término $W_p N_1$ representa la pérdida de la población del estado base ya que los átomos, debido al bombeo, son excitados hacia el nivel 3.

Si el análisis se centra en el caso estacionario, la razón del cambio temporal de la población de partículas para cada nivel de energía es cero:

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{dN_2}{dt} = \frac{dN_3}{dt} = 0 \quad (6)$$

Aplicando el caso estacionario (Ec. 6) a las Ecs. 3, 4 y 5, es posible obtener el número de átomos en el nivel de energía 2 y 3 en función de la población N_1 del estado base:

$$N_3 = \frac{W_p}{T_{32}} N_1 \quad (7)$$

$$N_2 = \frac{W_p}{T_{21} + W_{21}} N_1 \quad (8)$$

Cuando la inversión de población se alcanza en el estado estacionario, se cumple la condición de que $N_2 - N_1 > 0$. Por esa razón es necesario encontrar una expresión para $N_2 - N_1$ en función de las razones de cambio por unidad de tiempo en las transiciones entre los niveles de energía W_{ij} y T_{ij} y así poder delimitar una condición de la inversión de población en función de estos parámetros.

Comenzando el análisis a partir de la siguiente razón entre la condición de inversión de población y la población total:

$$\frac{N_2 - N_1}{N} = \frac{N_2 - N_1}{N_1 + N_2 + N_3} \quad (9)$$

Es posible reducir la Ec.9 al sustituir las Ecs. 7 y 8, obteniendo la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \frac{N_2 - N_1}{N} &= \frac{T_{32}(W_p - (W_{21} + T_{21}))}{T_{32}(T_{21} + W_{21}) + W_p T_{32} + W_p(T_{21} + W_{21})} \quad (10) \end{aligned}$$

Aplicando la condición $N_2 - N_1 > 0$ (inversión de población) a la Ec. 10, ahora se tendrá una nueva condición en función de las razones de cambio por unidad de tiempo de las transiciones de los átomos:

$$W_p > W_{21} + T_{21} \quad (11)$$

La desigualdad que describe a la inversión de población (Ec.11), da información de que es necesario que la razón del número de átomos por unidad de tiempo que son excitados del estado base hacia el nivel 3, debido al bombeo óptico, debe ser mayor que la razón del número de átomos que sufre un decaimiento radiante (emisión espontánea y emisión estimulada) del nivel intermedio (nivel 2) al estado base.

Por otra parte, en el proceso de inversión de población, se debe cumplir que el mayor número de átomos de la población debe de estar en el nivel intermedio (nivel 2), debido a que a este nivel de energía le están llegando una mayor cantidad de átomos (transición no radiante que va del nivel 3 al nivel 2), en comparación del número de átomos que están saliendo debido a un decaimiento por emisión espontánea y estimulada hacia el estado base. Esto es consistente, pues las transiciones no radiantes son procesos que tienen una duración menor que las de las transiciones radiantes, por lo que

$T_{32} > T_{21}$. Además, el tiempo de vida de los átomos en los niveles de energía es inversamente proporcional a las razones por unidad de tiempo del número de átomos, que sufre una transición entre dos niveles de energía, por lo que el tiempo de vida de los átomos en el nivel de energía 2 ($1/T_{21}$) es mucho mayor al tiempo de vida de los átomos en el nivel de energía 3 ($1/T_{32}$).

Hasta este punto ya se ha estudiado la emisión estimulada y el efecto de inversión de población en un sistema de tres niveles de energía. Cuando ya se conocían estos dos efectos, se necesitó diseñar el dispositivo que lograra emitir un haz láser, como ya se mencionó en la Sec. 2, el primer dispositivo fue el láser de rubí, cuya arquitectura consiste en una cavidad lineal resonante. Para culminar se describirá el funcionamiento de una cavidad lineal de un láser (láser Fabry-Perot) [40].

Un láser con una cavidad lineal es un sistema que consta de 2 espejos, uno totalmente reflejante y el otro parcialmente reflejante (por ejemplo, 90 % refleja y únicamente el 10 % lo transmite) (Fig. 6). Entre estos dos espejos se encuentra un amplificador que contiene un medio activo (por ejemplo, rubí, He-Ne, CO₂, etc). Se inyecta un bombeo óptico el cual va directamente al amplificador, esto provoca una emisión espontánea del medio activo, por lo que se emitirán fotones. Sin embargo, solo una pequeña proporción de fotones se propagará a través del eje óptico y se tendrán pérdidas considerables debido a que la mayoría de los fotones no se emitirán en la dirección del eje óptico. Los fotones propagándose en el eje óptico se amplifican por medio del proceso de emisión estimulada y después de varios viajes de ida y vuelta entre los espejos: *round-trips*, se estabiliza la potencia a un nivel de régimen estable. Posteriormente, una pequeña porción de los fotones saldrá a través del espejo parcialmente reflejante produciendo un haz de luz monocromático y coherente.

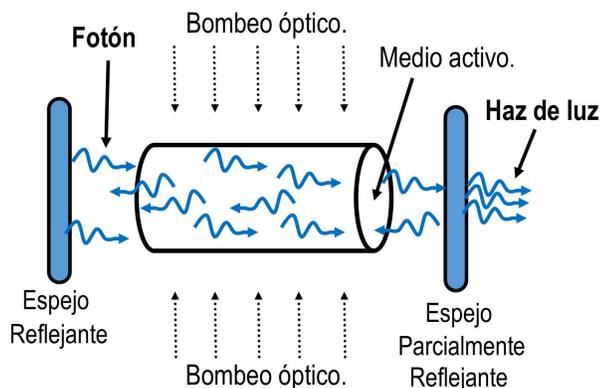


FIGURA 6. Esquema de una cavidad lineal de un láser.

4. Comentarios finales

La historia del láser estuvo marcada, por un gran número de contribuciones de diferentes grupos y líneas de investigación. Sin embargo, también es un tema de polémica, al discernir quién es el acreedor de la invención del láser, por un lado, estaba C. Townes con su gran prestigio académico y su trayectoria científica que lo respaldaba, por otra parte, estaba G. Gould con una investigación que no tenía mucha difusión pero estaba documentada y finalmente los japoneses J. Nishizawa y Watanabe, a los cuales los respaldaba la invención de varios dispositivos de semiconductor. Cada uno de estos científicos tuvo una prueba fehaciente del desarrollo del láser. Townes publicó sus resultados en un artículo en 1958 [6], siendo éste el científico con mayor difusión en su trabajo. G. Gould publicó en sus notas toda su investigación del láser en 1957, éstas tienen un registro ante notario público [20]. Debido a este registro, se sabe que Gould acuñó las siglas en inglés de láser (*LASER*). Por último, J. Nishizawa y Watanabe desarrollaron una patente del máser de semiconductor en abril de 1957, a pesar de que se registró como máser, este dispositivo entra en la categoría de láseres, inclusive J. Nishizawa en el 2009 lanzó una publicación sobre el desarrollo histórico del láser [41], argumentando que él tiene el primer registro de la invención del láser con su patente, ya que Gould registró sus notas 7 meses después.

Bajo los argumentos anteriores, se puede crear un debate de a quién se le debe nombrar padre del láser. Históricamente, cada uno de estos investigadores que disputaron por la invención del láser recibieron, de alguna forma, el reconocimiento por su investigación. Townes junto con Basov y Prokhorov ganaron el premio Nobel de física en 1964 por el principio de operación del máser-láser. G. Gould presentó varias patentes que dejaron muchas ganancias, logró obtener la patente de la implementación del bombeo óptico en los láseres, solicitada en el año de 1967 y publicada en 1977 [42]. Después de varios años, en 1987, G. Gould se quedó con parte del reconocimiento de la invención del láser con su patente titulada *light amplifiers employing collisions to produce a population inversion* [43].

Hasta el día de hoy, los láseres han alcanzado un desarrollo en nuestra vida cotidiana y siempre es importante reconocer el principio básico de su funcionamiento, así como su historia.

Agradecimientos

Los autores agradecen la lectura y las sugerencias propuestas por Karla Beatriz Vergara Vázquez, Rosalia Acho Herrera y Nayla Esmeralda Jiménez de la Vega, a este trabajo.

1. A. Einstein, *Phys. Z.* **18** (1917) 121. https://scholar.google.com/scholar?hl=en&as_sdt=0%2C5&q=+++++++Albert+Einstein.+Phys.+Z.+18+%281917%29+121.&btnG=
2. H. Kopfermann y R. Ladenburg *Nature* **122** (1928) 438. <http://doi.org/10.1038/122438a0>.
3. R. Ladenburg, *Rev. Mod. Phys.* **5** (1933) 243. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.5.243>
4. S.G. Lukishova, *J. Europ. Opt. Soc. Rap. Public.* **5** (2010) 10045s. <https://doi.org/10.2971/jeos.2010.10045s>.
5. V.A. Fabrikant, *Electronic and Ion Devices (Russian)* **41** (1940) 236.
6. A.L. Schawlow and C.H. Townes, *Phys. Rev.* **112** (1958) 1940. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.112.1940>
7. J.P. Gordon, H.J. Zeiger y C.H. Townes, *Phys. Rev.* **95** (1954) 282. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.95.282>
8. J.P. Gordon, H.J. Zeiger and C.H. Townes, *Phys. Rev.* **99** (1955) 1264. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.99.1264>
9. K. Shimoda, T.C. Wang y C.H. Townes, *Phys. Rev.* **102** (1956) 1308. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.102.1308>
10. J. Weber, *Transactions of the IRE Professional Group on Electron Devices PGED-3* (1953) 1. <https://doi.org/10.1109/IREP.GED.1953.6811068>
11. J. Weber, *Rev. Mod. Phys.* **31** (1959) 681. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.31.681>
12. N.G. Basov y A.M. Prokhorov, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **27** (1954) 431.
13. N.G. Basov y A.M. Prokhorov, *Sov. Phys. JETP.* **1** (1955) 185. <http://www.jetp.ac.ru/cgi-bin/e/index/e/1/1/p185?a=list>
14. N.G. Basov y A.M. Prokhorov, *Sov. Phys. JETP.* **3** (1956) 426. http://www.jetp.ac.ru/cgi-bin/dn/e.003_03_0426.pdf
15. A.M. Prokhorov, *Sov. Phys. JETP.* **7**(6) (1958) 1140. http://www.jetp.ac.ru/cgi-bin/dn/e.006_06_1100.pdf
16. A. Kastler, *J. Phys. Radium* **11** (1950) 255. <https://doi.org/10.1051/jphysrad:01950001106025500>
17. J. Hecht, *Laser Pioneers* (Academic Press, San Diego, CA, USA, 1992). pp.1-63.
18. R.H. Dicke, *Phys. Rev.* **93** (1954) 99. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.93.99>
19. R.H. Dicke, *Molecular amplification and generation systems and methods* US 2851652 A. (Publicación: septiembre, 1958). <http://www.google.com.na/patents/US2851652?hl=es>
20. J. Hecht, *Beam: the race to make the laser* (Oxford University Press, New York, USA, 2005) pp. 46-59.
21. D. Malacara, *Óptica tradicional y moderna* 3° ed. (Fondo de Cultura Económica, México D.F., 2002), pp. 60-73.
22. D.F. Nelson, R.J. Collins y W. Kaiser, *Physics Today* **63** (2010) 40. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3293412>
23. A. Javan, W.R. Bennett y D.R. Herriott, *Phys. Rev. Lett.* **6** (1961) 106. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.6.106>
24. M. Endo y R.F. Walter, *Gas lasers* (CRC Press. Taylor and Francis Group, FL USA, 2007) pp 287-541.
25. E. Snitzer, *Phys. Rev. Lett.* **7** (1961) 444. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.7.444>
26. G.P. Agrawal, *Applications of nonlinear fiber optics* 2° ed. (Academic Press, USA, 2008) pp. 179-244.
27. E. Hecht, *Óptica* 5° ed (Pearson, Madrid España 2017) pp. 620-623.
28. R.C. Powell, *Physics of solid-state laser materials* (Springer-Verlag, New York, USA 1998) pp.1-423.
29. W. Koechner, *Solid-state laser engineering* 6° ed. (Vol. 1). (Springer, USA 2006). pp. 1-701.
30. A. Lempicki y H. Samelson, *Phys. Lett.* **4** (1963) 133. [https://doi.org/10.1016/0031-9163\(63\)90140-9](https://doi.org/10.1016/0031-9163(63)90140-9)
31. A. Heller, *Phys. Today* **20** (1967) 34. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3034020>
32. P.P. Sorokin y J.R. Lankard, *IBM Journal of Research and Development* **10** (1966) 162. <https://doi.org/10.1147/rd.102.0162>
33. F.J. Duarte y L.W. Hillman, *Dye laser principles: with applications* (Academic Press. USA 1990). pp. 1-15.
34. Y. Watanabe y J. Nishizawa, *Semiconductor maser* Japanese Patent (1957) 273217.
35. M.I. Nathan, G. Burns, S.E. Blum, and J.C. Marinace, *Phys. Rev.* **132** (1963) 1482. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.132.1482>
36. M. Bertolotti, *Masers and lasers: an historical approach* 2da ed (CRC Press, Florida. USA 2015) pp. 217-230.
37. G.P. Agrawal y N.K. Dutta, *Semiconductor lasers* 2da ed. (Kluwer Academic Publishers, Massachusetts, USA. 2001) pp. 1-24.
38. V.Ter-Mikirtychev Valerii, *Fundamentals of fiber lasers and fiber amplifiers* (Springer Series in Optical Sciences, USA, Volume. 181, 2014). pp. 79-80.
39. K. Thyagarajan y A. Ghatak, *Lasers, Fundamentals and applications* 2° ed. (Springer Science+Business Media, LLC. 2010), pp. 101-105.
40. V. Aboites, *El láser* 2° ed. (Fondo de Cultura Económica. México D.F., 1998) pp. 19-33.
41. Jun-ichi Nishizawa, *Proc. Jpn. Acad., Ser. B* **85** (2009) 454. <https://doi.org/10.2183/pjab.85.454>
42. G. Gould, *Optically pumped laser amplifiers* U.S. Patent No. 4,053,845, 11 Oct. 1977. <https://www.google.com/patents/US4053845>
43. G. Gould, *Light amplifiers employing collisions to produce a population inversion* U.S. Patent No. 4,704,583 3 Nov. 1987. <https://patents.google.com/patent/US4704583A/en>