

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO FUNCIONAL DE GENERACIÓN OPTICA CUÁNTICA (LASER)

Omar Ormachea Muñoz

Centro de Investigaciones Ópticas - CIO

Universidad Privada Boliviana

oormachea@upb.edu

(Recibido el 1 de agosto 2007, aceptado para publicación el 28 de octubre 2007)

RESUMEN

Se diseñó y construyó un láser (prototipo funcional) sólido pulsado del tipo YAG:Nd⁺⁺⁺ excitado ópticamente por una lámpara flash (medio gaseoso = Xenón), con picos intensos de emisión en longitudes de onda cercanas a las bandas de absorción de los iones de Nd⁺⁺⁺. La longitud de onda de generación fundamental corresponde al infrarrojo $\lambda=1.064 \mu\text{m}$, armónica principal, con la posibilidad de doblar la frecuencia de emisión con el uso de un cristal de LiNbO₃, $\lambda=0.532 \mu\text{m}$, segunda armónica del láser correspondiente al diapason visible. El prototipo cumple con las especificaciones estándar para equipos de este tipo, pudiendo trabajar en los regímenes de Generación libre y de Q-switch. Su construcción se ha basado en el reciclaje de piezas y partes de equipos comunes, como discos duros de PC, lo que ha permitido costos 60-70 % inferiores a los de productos europeos o americanos del mismo tipo.

Palabras Clave: Láser, Generadores Cuánticos Ópticos, Óptica No-Lineal.

1. INTRODUCCION

En 1916, Albert Einstein estableció los fundamentos para el desarrollo de los láseres y de sus predecesores los máseres, utilizando la ley de radiación de Max Planck y basándose en los conceptos de emisión espontánea e inducida de radiación [1]. El primer láser construido en el diapason óptico fue diseñado por T. H. Maiman en el Hughes Research Laboratories en 1960, “láser de rubí” [2], [3]. Los centros activos usados fueron los iones de Cr⁺⁺⁺ que se presentan como impurezas en el cristal de Al₂O₃. Después del descubrimiento del láser de rubí, Sorokin y Stevenson [4] y Kaiser y Garret [5], crearon el láser sólido de cuatro niveles energéticos, donde el medio activo usado fue el cristal CaF₂ activado por iones de elementos de tierras raras. El siguiente paso importante en esta dirección lo dio Snitser [6] quien en 1961 disparó el primer láser activado con iones de Nd⁺⁺⁺.

Los posibles usos del láser son extraordinariamente variados. El láser se ha convertido en una herramienta valiosa en la industria, la investigación científica, las comunicaciones, la medicina, el arte y la tecnología militar, entre otras. Algunas aplicaciones son: Calentar, fundir o vaporizar materiales de forma precisa, taladrar diamantes, modelar máquinas herramientas, recortar componentes microelectrónicos, cortar patrones de moda, sintetizar nuevos materiales. Con los láseres se puede tomar fotografías con un tiempo de exposición de sólo algunas billonésimas de segundo, alinear las estructuras durante la construcción de carreteras y edificios y se intenta inducir la fusión nuclear controlada. Actualmente, se desarrollan conmutadores muy rápidos para su uso en aceleradores de partículas, se realiza la medición precisa de espectros atómicos y moleculares de materia existente en muy pequeñas cantidades y se usa para inducir reacciones químicas muy selectivas. Los láseres resultan ideales para las telecomunicaciones, se han desarrollado fibras ópticas de baja pérdida que transmiten luz láser para la comunicación terrestre, en sistemas telefónicos y redes de computadoras. También se han empleado técnicas láser para registrar información con una densidad muy alta. Con haces intensos y estrechos de luz láser es posible cortar y cauterizar ciertos tejidos humanos en una fracción de segundo sin dañar al tejido sano circundante. La importancia del láser sólido pulsado del tipo YAG está no sólo en su extensa aplicación científica, sino también en sus aplicaciones directas en medicina, cosmetología, monitoreo de la atmósfera y otros campos.

2. MOTIVACION Y OBJETIVOS

En la sociedad de la información y el conocimiento y en el contexto de un acelerado desarrollo científico y tecnológico y de globalización de los mercados, los países en desarrollo deben crear capacidades para adoptar y adaptar tecnologías competitivas si desean evitar la exclusión de sus poblaciones de los procesos de crecimiento económico, generación de empleos y superación de sus índices de desarrollo humano.

Este proceso debe realizarse en términos prácticos, buscando el establecimiento eficiente de infraestructuras de apoyo tecnológico con efectos multiplicadores en los aparatos productivos.

Una de las tecnologías básicas para este propósito es la del láser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, Amplificación de Luz por Emisión Estimulada de Radiación). En la actualidad, es prácticamente imposible imaginar un campo de investigación y desarrollo sin el uso de la óptica del láser, utilizado ampliamente en el desarrollo tecnológico actual y acompañado de repercusiones económicas, sociales e incluso políticas. Bolivia se encuentra actualmente relegada en el contexto Latinoamericano en las áreas científicas y productivas relativas a los láseres.

Este tipo de tecnología de punta, adaptada en Bolivia, tiene una importancia estratégica para la región, ya que el acceso a dichos elementos tecnológicos es muy limitado debido a la falta de recursos tanto humanos como de capital. Con la creación de bases científicas ópticas se puede apoyar al sector industrial, incrementar el nivel educativo y científico y contribuir a que Bolivia pueda participar en el contexto técnico-científico latinoamericano. La fabricación de equipos de tecnología de punta con costos relativamente bajos, es importante para desarrollar aplicaciones competitivas con respecto a equipos similares europeos o americanos, incrementando de esta manera la eficacia productiva de la región.

Las consideraciones anteriores han motivado la realización de la presente investigación, con el objetivo de diseñar y construir un prototipo funcional de generación óptica cuántica (luz láser), usando como base un cristal YAG:Nd⁺⁺⁺, a través del cual se podrán obtener pulsos de luz intensa, coherente y altamente direccionada, en el diapason infrarrojo y visible.

3. MARCO TEORICO

En este párrafo se dará una descripción del principio de funcionamiento del láser en general y de los fundamentos de los regímenes de trabajo de los láseres pulsados.

3.1 Principio de funcionamiento del láser

Existen cuatro procesos básicos en la generación de la emisión láser: el bombeo, la absorción, la emisión espontánea de radiación y la emisión estimulada de radiación.

- **Bombeo:** Se realiza mediante una fuente de radiación (una lámpara). Es el paso de una corriente eléctrica o el uso de cualquier otro tipo de fuente energética, que da lugar a la transición energética de los electrones de los átomos o moléculas a un estado de excitación.
- **Absorción:** Proceso mediante el cual un átomo o molécula absorbe un fotón. El sistema atómico se excita a un estado de energía más alto, pasando un electrón al estado metaestable.
- **Emisión espontánea de radiación:** Durante este proceso, los electrones vuelven al estado fundamental emitiendo fotones. Es un proceso aleatorio y la radiación resultante está formada por fotones que se desplazan en distintas direcciones y con fases distintas, generándose una radiación monocromática incoherente.
- **Emisión estimulada de radiación:** La emisión estimulada, base de la generación de radiación de un láser, se produce cuando un átomo en estado excitado recibe un estímulo externo que lo lleva a emitir fotones y así retornar a un estado de menor energía. El estímulo en cuestión, proviene de la llegada de un fotón con energía similar a la diferencia de energía entre los dos estados. Los fotones así emitidos poseen fase, energía y dirección similares a las del fotón externo que les dio origen. La emisión estimulada es la raíz de muchas de las características de la luz láser. No sólo produce luz coherente y monocromática, sino que también, "amplifica" la emisión de luz ya que, por cada fotón que incide sobre un átomo excitado, se genera otro fotón.

La estructura principal de un láser [7], [8], [9] consta del medio activo, los espejos que forman el resonador láser y el sistema de bombeo. En la Figura 1 se muestra la cavidad amplificadora con un sistema de bombeo y un par de espejos planos (o ligeramente cóncavos) en sus extremos. La línea punteada indica el eje óptico del sistema.

El par de espejos paralelos recibe el nombre de resonador óptico. Uno de los espejos del resonador es casi 100% reflejante y el otro tiene una reflectancia típica de 90%. Para comprender la función del resonador óptico, en la Figura 1 se muestra al oscilador óptico inmediatamente después de que el sistema de bombeo fue disparado. Cualquier fotón que sea emitido en una dirección diferente a la definida por el eje óptico del resonador se perderá, mientras que cualquier fotón emitido a lo largo del eje óptico del oscilador será amplificado por el proceso de emisión estimulada e inmediatamente se generará un enorme flujo de fotones confinados en el resonador que se propaga a lo largo del eje óptico. Si el resonador óptico no estuviera presente, después de disparar el sistema de bombeo, los átomos o moléculas que fueron excitados pasarían a su estado base debido al proceso de emisión espontánea, emitiendo fotones en todas direcciones y perdiendo la energía recibida.

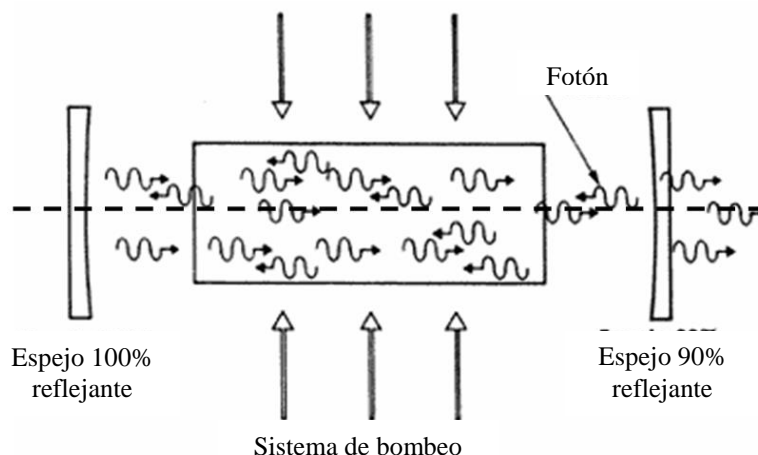


Figura 1 – Componentes principales del láser.

El resonador óptico permite extraer en forma eficiente la energía que el sistema de bombeo deposita en los átomos o moléculas contenidos en la cavidad amplificadora. Debido a que uno de los espejos del resonador tiene una reflectancia del 90%, el 10% de los fotones que incidan en él son transmitidos fuera del resonador óptico, formando un haz de luz muy intenso, monocromático (formado por fotones de idéntica energía), coherente (todos sus fotones están en fase ya que fueron producidos por el proceso de emisión estimulada) y altamente direccional. Éstas son las propiedades fundamentales de la luz láser generada por todo oscilador óptico.

3.2 Régimen de generación libre (free running - mode)

La técnica actual de los láseres permite obtener pulsos de diferentes magnitudes temporales, de ms-milisegundos (10^{-3} s) a ps-picosegundos (10^{-12} s), con valores de potencia de pico de los pulsos generados de 10^{12} Vatios y más. A continuación se describen los regímenes de operación más comunes de los láseres pulsados y sus principios de operación.

Si en el resonador del láser se encuentra sólo el elemento activo y ningún tipo de elemento óptico de control de la emisión de radiación, se habla del régimen de generación libre de radiación láser.

La generación libre puede observarse en los láseres tanto continuos como pulsados. La emisión libre en los láseres sólidos pulsados se caracteriza por una serie de pulsos relativamente cortos seguidos unos de los otros. La magnitud temporal de cada pulso es de alrededor de 10^{-7} – 10^{-6} segundos y la potencia de pico de cada pulso es de unos 10^4 – 10^5 Vatios, el intervalo temporal entre cada pulso es de 1 – 10 μ s.

En la Figura 2 se presentan tres oscilogramas de la emisión de un láser sólido correspondientes a tres tipos característicos de pulsación [10]:

- régimen de pulsaciones amortiguadas regulares, con la salida a una generación constante del nivel de potencia,
- régimen de pulsaciones regulares no-amortiguadas,
- régimen de pulsaciones no-regulares no-amortiguadas. Estas pulsaciones en la salida de emisión láser, fueron observadas por primera vez en experimentos realizados con el láser de rubí en 1960 [11].

3.3 Régimen de modulación del factor de calidad “Q” (Q – switch mode)

La idea de usar la modulación del factor de calidad del resonador del láser con bombeo óptico pulsado para obtener pulsos de luz cortos e intensos fue realizada en 1962 [12, 13]. El factor de calidad “Q” está definido por la siguiente expresión [9]:

$$Q = \frac{E \text{ (Energía almacenada en el sistema)}}{P \text{ (Potencia perdida en el sistema)}} 2\pi\nu_0 \quad (1)$$

donde ν_0 es la frecuencia de emisión láser.

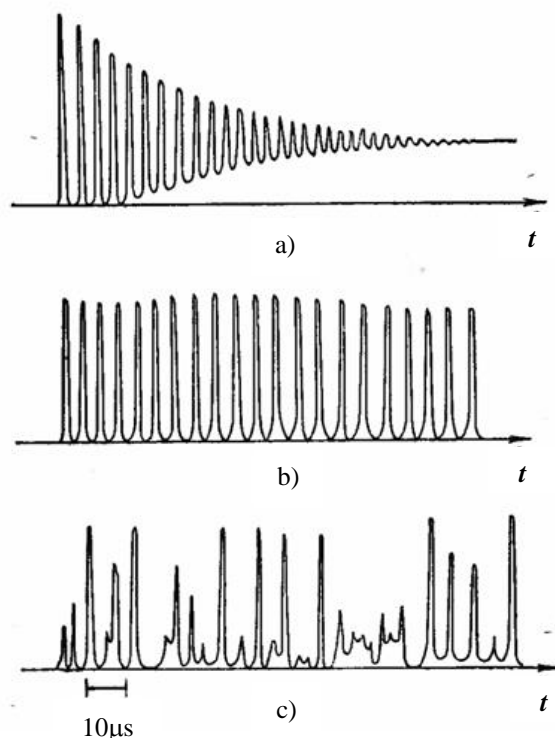


Figura 2 – Oscilogramas de la emisión de un láser sólido.

Controlando “Q” del resonador, se incrementan en un inicio las pérdidas. Esto significa que se sube forzosamente el nivel del umbral de generación (momento en que la generación láser se inicia). Esto da la posibilidad de incrementar en gran manera la inversión de la población del medio activo. Posteriormente, mediante una señal externa, se minimizan rápidamente las pérdidas del resonador y, consecuentemente, el nivel del umbral de generación. Como resultado se obtiene que la inversión de la población del medio activo se encuentre en un nivel muy alto comparado con el nuevo umbral de generación láser. En estas condiciones, se genera un único pulso corto de alta potencia llamado “pulso gigante”.

La potencia obtenida experimentalmente en este régimen de generación de pulsos gigantes alcanza a 10^9 Vatios, con un tiempo de vida del pulso de 10 – 100 ns. El mínimo tiempo de vida del pulso en este régimen puede alcanzar valores de 1 – 3 ns [14].

Existen dos formas de realización de este régimen: modulación del factor de calidad “Q” activo y pasivo. En este trabajo se analizará solamente el régimen de modulación de “Q” pasivo.

La modulación del factor de calidad “Q-pasivo” está basada en el uso de elementos ópticos no lineales, insertados en el resonador óptico, cuyas características ópticas cambian en función de la intensidad de la emisión generada por el medio activo. Se usan filtros basados en el efecto de saturación de la absorción. Estos filtros tienen la capacidad de absorber fotones en alguna longitud de onda determinada. Cuando la intensidad de luz es muy alta, los elementos indicados se saturan y pierden sus propiedades de absorción, volviéndose completamente transparentes para dicha longitud de onda (se saturan). También se usan espejos no lineales, que en dependencia de la intensidad de la emisión del medio activo, cambian los coeficientes de reflexión [10]. La idea de la aplicación de estos elementos ópticos no lineales en la electrónica cuántica fue descrita en 1964 [15] y puesta en práctica rápidamente para la obtención de pulsos gigantes en el láser de rubí [16].

En la Figura 3 se muestra el proceso de formación de un pulso gigante bajo la modulación pasiva del factor de calidad “Q”. La modulación se realiza con el uso de un filtro basado en el efecto de saturación de la absorción. La curva $P(t)$ en el dibujo describe el cambio en el tiempo que experimenta la intensidad de la emisión generada. También se muestra el cambio en el tiempo del coeficiente de absorción resonante del filtro en la longitud de onda de generación láser (curva $\chi_a(t)$) y la densidad de la inversión de la población de los niveles del medio activo $N(t)$. El estado inicial corresponde al filtro no saturado ($\chi_{0a} = \chi_a(t)$). Con la llegada de emisión de bombeo óptico al medio activo, el parámetro N se incrementa. En el momento en que alcance el valor del umbral máximo N_{umbral}^{max} , empieza a producirse la generación

láser. Este momento fue elegido en el gráfico como el momento inicial ($t=0$). El proceso de formación del pulso gigante está compuesto de dos etapas: etapa de desarrollo lento (lineal) t_0 y la etapa corta de desarrollo rápido (no lineal) t_1 . En el régimen indicado “Q-pasivo”, la etapa t_0 tiene una duración típica de alrededor de $1\mu s$. En el gráfico se observa que el filtro se satura solamente en la segunda etapa (no lineal) de formación del pulso, la duración típica de la segunda etapa es de unos $10ns$.

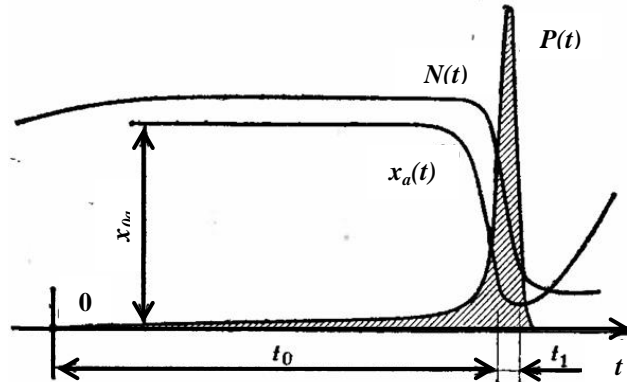


Figura 3 – proceso de formación de un pulso gigante.

4. DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN YAG:Nd⁺⁺⁺ LASER

Un láser sólido pulsado del tipo YAG:Nd⁺⁺⁺ consta esquemáticamente de tres partes: El sistema electrónico y de bombeo óptico, la parte opto-mecánica y el sistema de enfriamiento.

4.1 El sistema electrónico y de bombeo óptico

El bombeo óptico del sistema está compuesto por una lámpara flash (medio gaseoso: Xenón). Podrían usarse lámparas flash con Kriptón ya que el espectro de emisión de ambos gases tiene picos muy cercanos a los picos de absorción del cristal YAG:Nd⁺⁺⁺, Figura 4.

La salida espectral de las lámparas flash está determinada especialmente por la densidad de corriente i que fluye por unidad de área seccional de la lámpara [17], donde d es el diámetro de la lámpara e I es la corriente que fluye a través de ella.

$$i = \frac{4I}{\pi d^2} \quad (2)$$

En una lámpara pulsada, la cantidad de flujo de corriente varía con el tiempo, incrementándose desde cero hasta un máximo y decreciendo después. La salida espectral varía también con el tiempo. La representación gráfica de esta variación es usualmente un gráfico tiempo-integral de la salida de la lámpara. La variación temporal es llamada la relación “ $E_0 : TA$ ”. Las unidades de medición de esta relación son Vatios sobre centímetro al cuadrado (W/cm^2) que es la medida de la densidad de potencia relacionada a la densidad de corriente. E_0 – es la energía del pulso en Julios (J), T – es el ancho del pulso en segundos (s) y A – se refiere a la superficie interna de la lámpara en la región de descarga (aproximadamente πdL_A , donde L_A es la longitud de arco de la lámpara).

Las líneas espectrales en el infrarrojo – cercano son dominantes en bajas densidades de potencia de alrededor de $2500 W/cm^2$, Figuras 4b y 4c. La comparación de la salida espectral de las lámparas de Xenón y Kriptón muestra, al analizar las dependencias, que las lámparas de Kriptón son generalmente escogidas para densidades de potencias bajas (magnitudes típicas alrededor de los $16000 W/cm^2$). A densidades de potencia mayores a los $16000 W/cm^2$, las lámparas de Xenón resultan más eficientes como fuentes de bombeo óptico para los cristales del tipo YAG:Nd⁺⁺⁺, debido a que éstas tienen una mayor eficiencia de conversión a altas densidades de potencia en relación a las de Kriptón.

En la construcción del prototipo fue usada una lámpara flash de Xenón “INP-3-7/80A” de construcción rusa, Figura 5, muy usual en láseres pulsados del tipo YAG. Esta lámpara puede trabajar con una frecuencia de pulsado de hasta 10 Hz. Respecto a la parte electrónica, en la Figura 6 se muestra el circuito electrónico básico [18] que se usa para disparar la lámpara flash. Está conformada por la fuente de alta tensión F_{AT} , Figura 7, la fuente del trigger F_T , Figura 8, el trigger, el sistema de almacenaje de energía eléctrica compuesto por condensadores C y la lámpara flash.

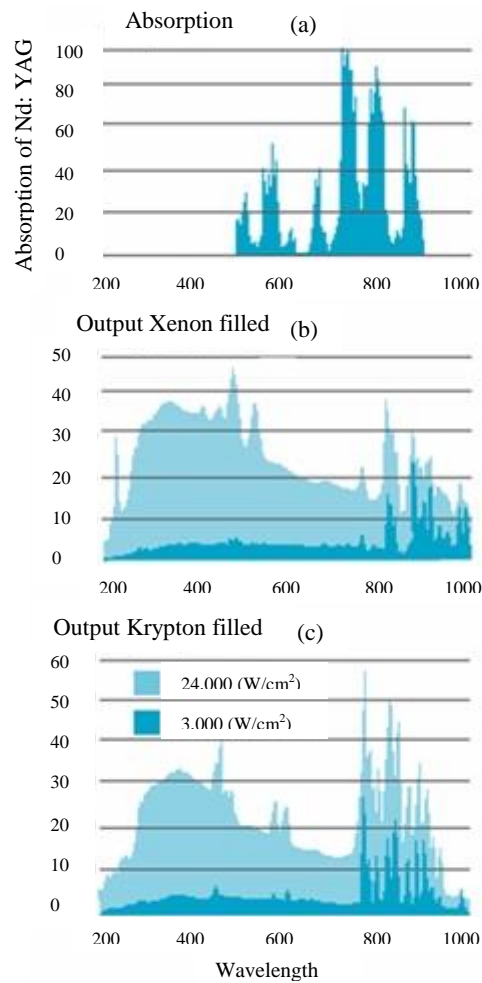


Figura 4 – Espectros de absorción del cristal YAG:Nd⁺⁺⁺ (a) y emisión de lámparas de Xenón (b), Kriptón(c)



Figura 5 – Lámpara flash INP-3-7/80A.

La fuente de alta tensión fue diseñada para dar los siguientes parámetros: Potencia = 1 kW de potencia y 400 voltios en AC, que posteriormente se rectifica a una tensión de $U = 560$ V en DC. La fuente del *trigger*, a su vez, proporciona una tensión $U = 300$ V, que a su vez se transforma, por el secundario del *trigger*, a $U = 9$ kV de pico. Los condensadores fueron agrupados de tal manera que poseen una capacitancia total C de $8400 \mu\text{F}$ y una tensión de $U = 500$ V. La energía almacenada en el sistema está dada por la siguiente relación [17].

$$E = \frac{CU^2}{2} \quad (3)$$

A partir de esta relación, se calcula directamente la energía empleada en el sistema y se obtiene $E=1050$ J. Este valor sugiere que el sistema de bombeo óptico desprende una gran cantidad de calor, de donde surge la necesidad de un sistema de refrigeración forzado por circulación de un flujo continuo de agua destilada.

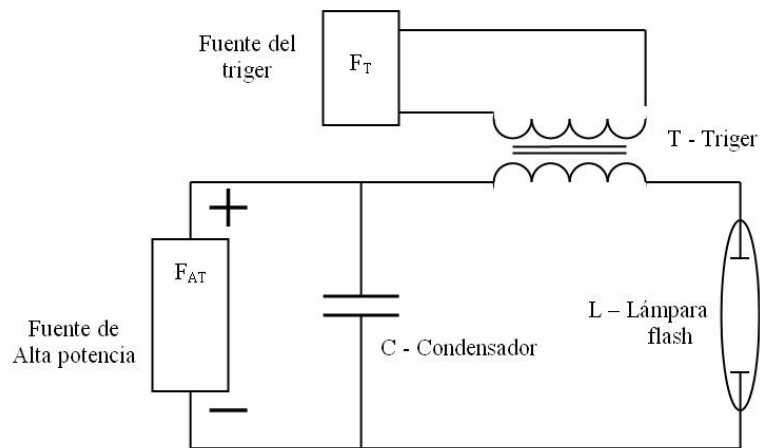


Figura 6 – Circuito básico electrónico.



Figura 7 – Fuente de alta tensión.



Figura 8 - Transformador – trigger.

El proceso de funcionamiento es el siguiente: La F_{AT} carga los condensadores hasta su máximo valor en capacitancia y voltaje. Esa tensión no es suficiente para que se realice la descarga a través de la lámpara flash y es necesario conectar posteriormente el *trigger*, cuya tarea es la de abrir el canal de descarga en la lámpara flash introduciendo un voltaje de pico de alrededor de 9 kV. Eso se logra con la fuente F_T que introduce una tensión de alrededor de 300 V al primario y el secundario, que tiene calculado un factor de 30, proporciona la tensión necesaria. De esta manera se produce una descarga rápida, acompañada de toda la corriente almacenada en los condensadores.

- **Problemas y soluciones:** Este proceso requirió el diseño y experimentación de una decena de transformadores de la F_{AT} y del *trigger*. Se resolvieron varios problemas relacionados con el arranque de la lámpara flash, se optimizaron los parámetros de tensión, de voltaje de la F_{AT} y de voltaje de pico del *trigger*. Uno de los parámetros más importantes del sistema-*trigger*, es su impedancia, que debe ser menor o igual a la impedancia interna de la lámpara flash. Eso se consiguió incrementando el diámetro del cable de cobre usado en el transformador de la F_T , hasta un valor de $R = 0.3 \Omega$. Este valor de la impedancia asegura que toda la corriente almacenada en los capacitores circule con la menor resistencia posible a través del sistema- *trigger*. En cuanto a los condensadores, en una primera etapa se montaron cinco bloques en paralelo. Cada uno de estos bloques estaba conformado por 10 condensadores en serie. Los condensadores empleados tenían una capacidad de 220 – 370 μF y un voltaje de 200 V cada uno. El problema principal que se presentó fue que la carga almacenada en cada uno de estos condensadores no fue homogénea debido a que los condensadores eran diferentes. El problema se resolvió con la adquisición de cuatro condensadores de alta capacitancia de iguales parámetros. Esto permitió una carga homogénea en los cuatro dispositivos.

Los parámetros de potencia de la fuente de alta tensión no fueron optimizados. Para cargar los condensadores a su máxima expresión se necesitan alrededor de tres minutos.

4.2 La parte opto-mecánica

La parte opto-mecánica fue realizada según la descripción del parágrafo 3b de este artículo. Para la construcción del resonador óptico se usaron dos espejos dieléctricos planos, de reflectancias $R_1 = 99,9\%$ y $R_2 = 20\%$ para la longitud de onda $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$, correspondiente al infrarrojo. El resonador y los montadores ópticos fueron fabricados de aluminio, de mayor facilidad de manejo que metales más duros como el hierro o acero, Figuras 9 y 10. En el elemento opto-mecánico, se introdujeron resortes y tres pernos sujetadores, lo que permite dar al elemento la movilidad necesaria. Todo el material usado fue reciclado a partir de discos duros de PC fuera de servicio, como se ve en las Figuras 9 y 10. Este procedimiento abarató los costos substancialmente. La construcción de las piezas necesarias a partir de estos materiales fue realizada por el autor del presente trabajo.



Figura 9 – Estructura del resonador óptico.

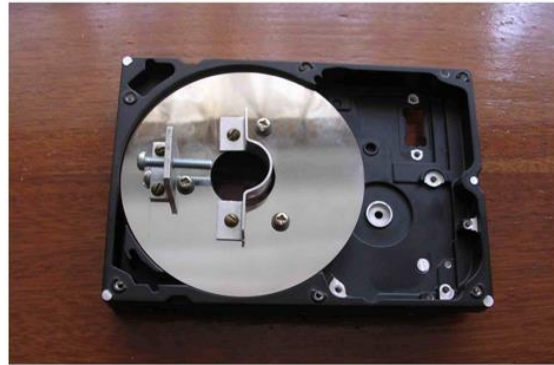


Figura 10 – Elemento opto-mecánico.

- **Problemas y soluciones:** En esta etapa cabe mencionar que los espejos dieléctricos y el cristal YAG:Nd⁺⁺⁺ fueron adquiridos de empresas europeas especializadas en el rubro, ya que estos elementos no pueden ser fabricados en nuestro país.

Una de las partes más complejas del sistema opto – mecánico fue la construcción del *quantron*, Figura 11, el elemento que envuelve la lámpara flash y el medio activo. En su interior se encuentra una pieza de vidrio sólido con una película reflectante metálica que permite usar al máximo y de manera más efectiva el bombeo óptico producido por la lámpara. Este elemento es hermético, en su interior circula el agua destilada que permite controlar la temperatura de los elementos ópticos.



Figura 11 – Quantron.

4.3 El sistema de refrigeración

La eficiencia de conversión de energía eléctrica en energía óptica de bombeo del medio activo, que a su vez se transforma en energía de emisión láser, es muy baja (del orden del 3 - 7%). Gran parte de la energía eléctrica se convierte en calor y surge la necesidad de incorporar un sistema de refrigeración del sistema de bombeo óptico y del medio activo.

El sistema de refrigeración consta de una bomba de agua de mediana potencia, que sirve para hacer circular al agua destilada a través del *quantron* y un sistema de sensores de temperatura que inicia automáticamente el funcionamiento de los ventiladores del sistema de disipación cuando el líquido excede la temperatura de 25 ° C.

5. MONTAJE Y FUNCIONAMIENTO

Una vez reunidos todos los componentes esenciales y producida la generación láser a una longitud de onda $\lambda=1.064 \mu\text{m}$, correspondiente al infrarrojo (denominada armónica principal), se introdujo un cristal a la salida del resonador óptico (LiNbO_3), el cual tiene la propiedad de doblar la frecuencia de la luz láser emitida, obteniendo radiación en el diapasón visible de $\lambda=0.532 \mu\text{m}$ (denominada segunda armónica del láser).

El prototipo puede trabajar en los dos regímenes anteriormente mencionados. En el primer régimen (modo de generación libre) no se incluyó ningún elemento de control de radiación dentro del resonador óptico. En el caso del régimen de modulación del factor de calidad "Q" (pasivo), se usó un cristal del tipo LiF, el cual fue introducido en el resonador óptico, dicho cristal trabaja como un absorbente saturable óptico. Su funcionamiento fue descrito de manera explícita en el marco teórico de este trabajo. La diferencia temporal e incremento en la potencia de los dos regímenes, fue fácilmente observable al producir la segunda armónica en el diapasón visible. El proceso de doblaje de frecuencia (conversión de emisión infra-roja a visible), es un proceso no lineal y de dependencia cuadrática relativa a la intensidad de luz de la armónica principal (luz infra-roja). En el proceso de obtención de generación láser en el diapasón visible (segunda armónica), se observó claramente la diferencia de intensidades entre los dos regímenes, siendo mucho más intensa la emisión visible en el régimen de *Q-switch*, corroborando el decrecimiento temporal del pulso y, consecuentemente, el incremento en la potencia de salida de la emisión láser.

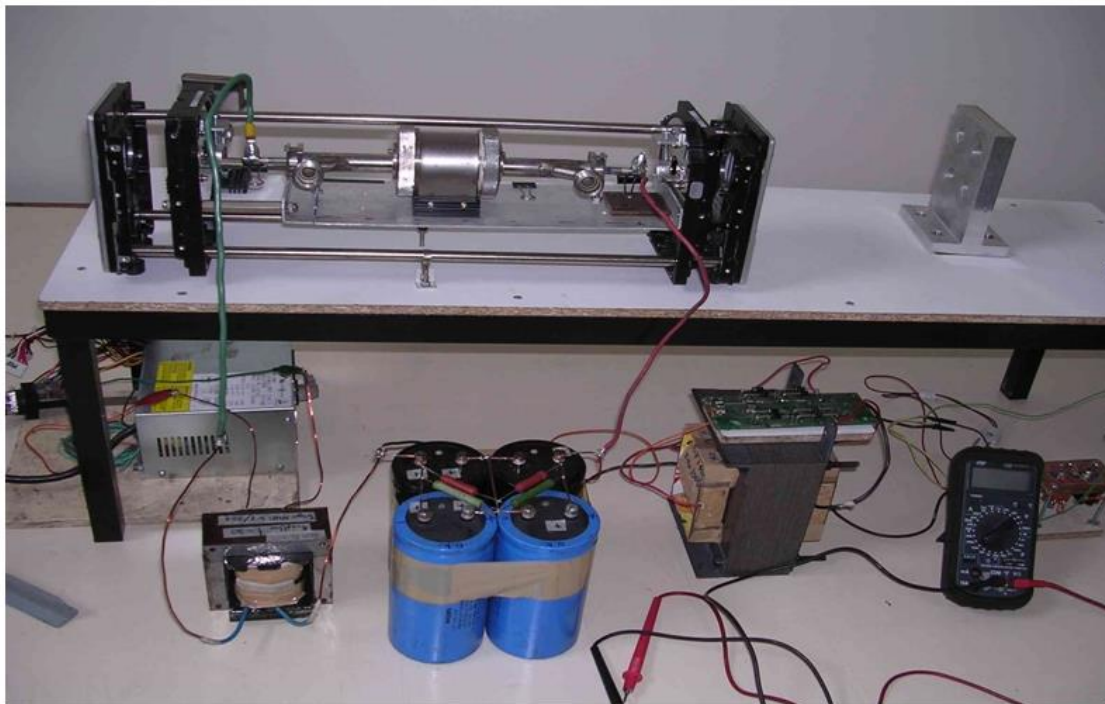


Figura 12 – Prototipo funcional YAG:Nd⁺⁺⁺ y anexos.

6. CONCLUSIONES

Por primera vez en Bolivia fue diseñado y construido un prototipo funcional (láser sólido pulsado del tipo YAG:Nd⁺⁺⁺), el cual puede trabajar en las longitudes de onda de $\lambda=1.064 \mu\text{m}$, $\lambda=0.532 \mu\text{m}$ y en los regímenes de Modo de Generación Libre (*free running mode*) y Modo de Modulación del Factor de Calidad "Q" (*Q-switch*).

La innovación de este proyecto está referida al uso de elementos eléctricos y electrónicos comerciales, no diseñados específicamente para tecnología láser, además del reciclaje de piezas y partes metálicas, teniendo como resultado una reducción de costos de hasta un 60-70 % con respecto a productos europeos o americanos del mismo tipo.

En una etapa posterior del proyecto, se tiene previsto automatizar el sistema de disparo y optimizar todos los parámetros de potencia de la fuente para subir la frecuencia de emisión hasta 1 Hz. También se implementará un amplificador óptico para el aumento de la potencia en ambos regímenes.

La radiación láser emitida por el prototipo construido, será aplicada en el campo de la física de la atmósfera para el estudio de perfiles de temperatura y espectros moleculares y en el área ambiental para procesos de degradación de componentes tóxicos, como el cianuro, en soluciones líquidas.

La experiencia adquirida en este trabajo permitirá el diseño y la construcción de láseres gaseosos continuos, como ser de He – Ne, con fines de registro y reconstrucción de hologramas destinados a la protección de bienes intelectuales, de láser continuo de CO₂ con el objeto de corte de materiales y de láseres líquidos sintonizables pulsados basados en soluciones colorantes, en estos láseres, la segunda armónica del prototipo construido en este proyecto servirá de bombeo óptico.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Einstein, *Zs. Phys.*, vol. 18, 1917, pp. 21.
- [2] T.H. Maiman, *Phys. Rev. Letters*, vol. 4, 1960, pp. 564.
- [3] T.H. Maiman, *Phys. Rev.*, vol.123, 1961, pp. 1145.
- [4] P.P. Sorokin and M.J. Stevenson, *Phys. Rev. Letters*, vol.5, 1960, pp. 557.
- [5] W. Kaiser et al. *Phys. Rev. Letters*, vol. 123, 1961, pp. 766.
- [6] E. Snitser. *Phys. Rev. Letters*, vol. 7, 1961, pp. 444.
- [7] O. Zvelto. *Principles of lasers*, 4ed., Springer, 1998.
- [8] L.V. Tarasov. *Física de los procesos en los generadores de emisión óptica coherente*, MIR, 1981, en ruso.
- [9] F. Kaczmarek, *Introducción a la física de láseres*, MIR, 1981, en ruso.
- [10] Y.I. Janin, *Dinámica de los generadores cuánticos* (Radio física cuántica T.2), M. Radio Soviética, 1975.
- [11] R. Collins et al. *Phys. Rev. Letters*, vol. 5, 1960, pp. 303.
- [12] F. Me Clung and R. Hellwarth. *J. Appl. Phys.*, vol. 33, no. 3, 1962, pp. 828.
- [13] R. Hellwarth. “Q-modulation, of lasers.” In: *Lasers*. Ed. by A. Levine, v. 1, New York: Inc., 1966.
- [14] V.G. Dmitriev et al. *Técnica Electrónica*, serie 10: Electrónica Cuántica, 1, 1975, pp.30.
- [15] L.A. Rivlin, *JETF*, vol.47, no. 8, 1964, pp.624.
- [16] C. Bret and F. Gires Giant, *Appl. Phys. Letts*, vol. 4, no. 10, 1964, pp. 173.
- [17] Internet: http://www.heraeus-noblelight.com/en/laser-and-ipl-lamps/information-for-laser-lamps/services-and-events/the-lamp-book.html?no_cache=1&sword_list%5B%5D=book (The lamp book – technical reference book for arc and flash lamp).
- [18] J.T. Verdeyen. *Laser electronics*, PH, 1995.