

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA**

• • **FACULTAD DE CIENCIAS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE FISICA**



TESIS PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE  
LICENCIADO EN FISICA

TITULADO:

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UN LASER  
SUPERRADIANTE DE NITRÓGENO CON APLICACIÓN AL  
BOMBEO DE UN LASER DE COLORANTES**

PRESENTADO POR:

**BACH. LADISLAO JESÚS BASURTO PINAO**

Lima – Perú

2003

## RESUMEN

Se presenta el diseño, construcción y evaluación de un prototipo de láser de Nitrógeno molecular; partiendo de los mecanismos fundamentales de operación. Para tal fin, se ha recopilado información sobre el diseño y fabricación de láseres de nitrógeno, incluyendo detalles prácticos. El presente trabajo se ha distribuido en capítulos que describimos brevemente.

En el Capítulo I; se describen detalles del fundamento teórico, el principio fundamental de un láser, es decir plantear los mecanismos de absorción y emisión de fotones (energía) en su proceso simple de dos niveles de energía, obteniendo para el caso emisiones de tipo espontánea y de tipo estimulada, que de acuerdo a las relaciones de las probabilidades de absorción, emisión espontánea y emisión estimulada, determinar las condiciones de emisión de los fotones (energía) en un equilibrio termodinámico.

En el capítulo II, se desarrollan detalladamente los pasos del prototipo láser tanto en los materiales utilizados como en sus etapas de construcción, presentando las características y parámetros de operación. La emisión en el ultravioleta UV ( $3771 \text{ \AA}$ ) es superradiante, el bombeo se realiza por impacto electrónico a través de una descarga eléctrica (circuito Blumlein), generando una energía promedio por pulso de 0.1 mJ y una potencia pico promedio del pulso 100.06 kW.

En el capítulo III, básicamente se detalla el estudio espectroscópico molecular, de la molécula de nitrógeno. Donde los sistemas moleculares a diferencia de los atómicos, además de tener niveles energéticos electrónicos, poseen subniveles vibracionales y rotacionales, la transición óptica se puede llevar a cabo entre distintos niveles vibracionales o en diversas combinaciones de ellos. Para la molécula de nitrógeno molecular gaseoso y de acuerdo a los factores de Franck-Condon y las probabilidades de transición se tiene un láser

UV (luz coherente) con una longitud de onda de 3771 Å (O-O), 3159 Å (1-O) y 3577 Å (O-1).

En el capítulo IV, láser de colorante; el láser UV de nitrógeno construido es utilizado para bombear el colorante (rodamina) y obtener un láser colorante en el espectro visible (357 – 708 nm), con rango de sintonía entre 30 y 60 nm si fuera necesario. Se da una explicación básica de los aspectos de ganancia de energía por la sustancia y su respectiva emisión (fluorescencia). Se tiene también el arreglo necesario (la óptica) para producir el láser de colorante, los materiales y equipo necesario; para nuestro ensayo utilizamos el colorante rodamina 6G.

## **INDICE.**

Introducción	1
Objetivos	2
Capítulo 1:	
1. Fundamento teórico	
1.1. Principio fundamental del láser	3
1.1.1.- Absorción espontánea	3
1.1.2.- Emisión espontánea	4
1.1.3.- Emisión estimulada	5
1.2. Equilibrio térmico	8
1.3. La inversión de población	12
1.4. Mecanismos de excitación	13
1.4.1. Bombeo óptico	13
1.4.2. Bombeo por impacto electrónico.	13
1.4.3. Excitación eléctrica de un gas	14
1.4.4. Excitación por colisiones con los átomos	15
1.4.5. Excitación química	15
1.4.6. Excitación por corriente eléctrica en láseres de diodo	15
Capítulo 2:	
2.- Trabajo experimental	16
2.1.- La cavidad óptica	17
2.1.1.- Criterio de diseño	17
2.1.2.- Paredes del contenedor	17
2.1.3.- Los electrodos	17
2.1.4.- La armadura en el contenedor	19
2.2.- Operación del láser súper-radiante de nitrógeno	22
2.2.1.- Manejo del gas nitrógeno en la cavidad	23
2.2.2.- Características del láser de nitrógeno	24
2.3.- Medida de la energía y potencia del pulso	25
2.4.- Pulso láser en el osciloscopio	26

## Capítulo 3:

3.-	Funcionamiento de este tipo de láser	
3.1.-	Funcionamiento del láser de nitrógeno	30
3.2.-	Condición de excitación del nitrógeno	33

## Capítulo 4:

4.-	Láser de colorantes	
4.1.-	Láser pulsado de colorantes	41
4.2.-	Medio activo en el láser de colorante	42
4.3.-	Características de un colorante	42
4.4.-	Diagrama simplificado de niveles de energía del láser colorante	44
4.5.-	Tiempo de vida del nivel excitado en el láser de colorante	45
4.6.-	Destino de la energía absorbida	45
4.7.-	Configuración para láser de rodamina B (6G)	47

## PARTE EXPERIMENTAL

4.8.-	Elementos utilizados	
4.8.1.-	Láser de bombeo	48
4.8.2.-	La óptica	49
4.8.3.-	Láser sintonizable	52
4.9.-	Característica de la rodamina B (6G)	55
4.10.-	Ventajas del láser de colorante	58
4.11.-	Inconvenientes del láser de colorantes	58
4.12.-	Aplicaciones del láser de colorantes	59
4.13.-	Características del láser de colorantes	59

Conclusiones	60
--------------	----

Anexo A	61
Anexo B	62
Anexo C	64
Anexo D	68

Referencias	70
-------------	----

## INTRODUCCION

*Todo láser consta de tres partes fundamentales: El medio amplificador o medio activo, la fuente de excitación y la cavidad óptica. En nuestro caso, el medio activo es el Nitrógeno contenido en la cámara de descarga. La fuente junto con un circuito de excitación, genera una descarga eléctrica pulsada de alta tensión que excita el gas.*

*Con respecto a la cavidad óptica que produce la retroalimentación del amplificador, en los láseres de nitrógeno (  $N_2$  ) ésta no es estrictamente necesaria debido a la alta ganancia del medio activo.*

*La excitación inicial de las moléculas (Bombeo) se lleva a cabo por impacto electrónico, dicha excitación puede ser longitudinal o transversal.*

*Los principales atractivos de estos láseres son su facilidad de operación y su alta potencia.*

*La motivación de este trabajo es:*

- *Obtener pulsos cortos de alta potencia.*
- *Disponer de fuentes láser en el ultravioleta con potencias moderadas para realizar estudios espectroscópicos, bombear láseres sintonizables de pigmento orgánico, etc.*

## **Objetivos.**

Construir un dispositivo láser superradiante que emite en el rango ultra-violeta del espectro electromagnético, cuyo medio activo sea el nitrógeno gaseoso, (emite en una longitud de onda de 337.1 nm) que sea fácil de maniobrar y pueda ser reproducido por estudiantes de nivel medio o superior sin experiencia previa.

Para tal propósito se utilizaran materiales que fácilmente lo encontramos en nuestro mercado haciendo que su construcción sea relativamente simple y económica.

El láser construido lo usaremos para bombear un colorante (rodamina 6G) para producir un láser de colorante que emite en el rango visible del espectro electromagnético, además de ello su uso será muy valioso en experimentos de la óptica en general.

## CAPITULO 1.

### 1.- FUNDAMENTO TEORICO.

#### **1.1.- Principio fundamental de un láser:** [1][19]

Es un emisor de radiación coherente y está conformado por un medio activo, que puede ser líquido, sólido o gaseoso, excitado convenientemente y confinado en una cavidad resonante. La radiación coherente se obtiene mediante la amplificación de luz debido a un proceso de emisión estimulada.

Por simplicidad se considera un átomo con dos niveles de energía posibles, un nivel superior  $E_2$  y un nivel inferior  $E_1$ . (fig. 1.1).

##### **1.1.1.- Absorción espontánea:**

Si el átomo se encuentra inicialmente en el estado  $E_1$  (estado estacionario), para que ocurra una transición hacia el nivel  $E_2$ , este debe excitarse, es decir el electrón exterior, del que depende la actividad fisicoquímica del elemento, absorbe la energía necesaria y pasar de su órbita estacionaria inicial de energía  $E_1$  a otro superior de energía  $E_2$ , donde la correspondiente frecuencia de la radiación absorbida esta dada por la ecuación de Planck.

$$\nu_{12} \cdot h = E_2 - E_1 \quad (1,1)$$

$h$  es la constante de Planck.

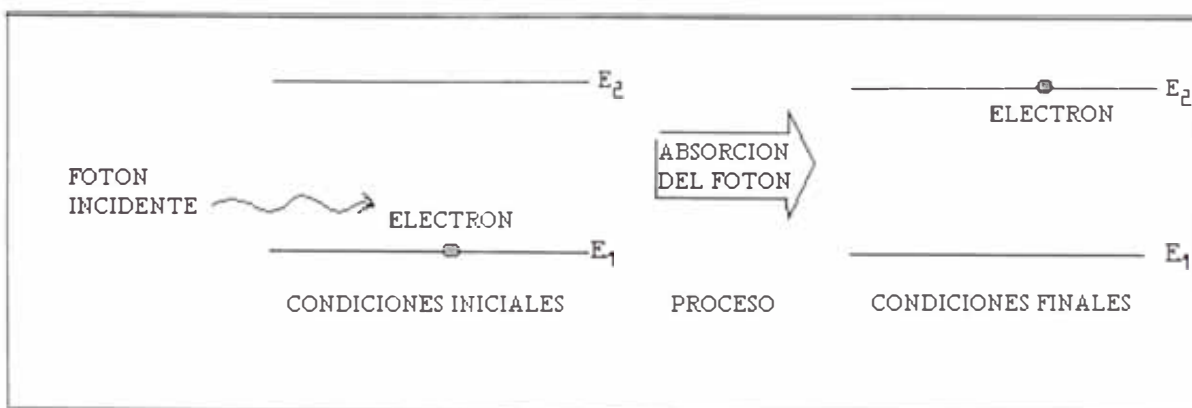


Fig. 1.1 Proceso de absorción de un fotón.



### 1.1.2.- Emisión espontánea:

Al contrario del proceso anterior, el electrón excitado tiende a volver a su estado fundamental, es decir del nivel excitado de energía  $E_2$  al nivel inicial de energía  $E_1$ , cosa que puede ocurrir radiando el exceso de energía (emisión espontánea) que este había adquirido (absorbido), con una frecuencia dada por la relación anterior(  $\nu_{12}$  )

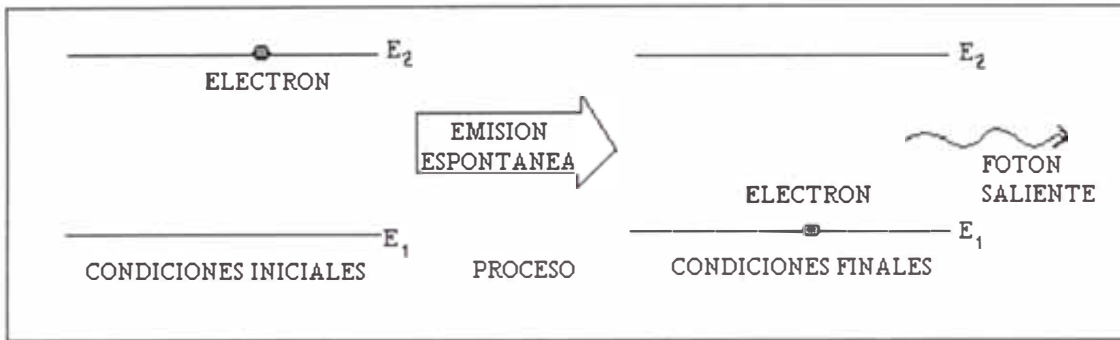


Fig. 1.2 Proceso de emisión espontánea de un fotón.

Ya en 1917, A. Einstein muestra la existencia de dos tipos posibles de emisión, la emisión espontánea (fluorescencia) y la emisión estimulada (superradiación).

La emisión espontánea corresponde a la desexcitación natural del nivel superior  $E_2$  hacia el nivel inferior  $E_1$  con un tiempo de duración de  $t_{21}$ . Cuya probabilidad esta dada por la siguiente ecuación:

$$W_{21} = A_{21} = (t_{21})^{-1} \quad (1,2)$$

$A_{21}$  Coeficiente de Einstein.

En este caso cada partícula excitada irradia un fotón independientemente de las demás, siendo esta emisión incoherente y de fases arbitrarias. Ahora, sin embargo puede ocurrir que la radiación emitida espontáneamente por un átomo alcance a otro átomo excitado de la misma especie, cuyo electrón periférico se encuentra en el nivel superior de energía  $E_2$ , en tales condiciones A. Einstein postuló que se produce la emisión de radiación por el segundo átomo por efecto de la interacción de éste con la radiación emitida por el primero. (fig. 1.3).

$$W_{21} = B_{21} \rho(\nu_{21}) \quad (1.5)$$

$B_{21}$  representa el coeficiente de Einstein para la emisión estimulada.

El proceso de emisión espontánea emite sin campo de radiación externa y aumenta el número de población de cualquier modo de frecuencia adecuada  $\nu_{21}=(E_2 -E_1)/h$  con una dirección arbitraria en la cavidad óptica.

La emisión isotrópica crea iguales probabilidades para cada uno de estos modos. Donde, la emisión depende exclusivamente de las propiedades de las partículas (ecuac. 1,2)

$$W_{21}(\text{esp.}) = A_{21}$$

$A_{21}$  es el coeficiente de Einstein para la emisión espontánea del nivel 2 al 1.

Como estamos suponiendo que el átomo posee solo dos niveles simples de energía,  $E_1$  y  $E_2$ , con  $E_2 > E_1$ . Además si  $N_1$  es la población en el nivel 1, de energía  $E_1$  con  $\rho(\nu_{12})$  densidad de campo de radiación con quien interactúan los  $N_1$  átomos y con la frecuencia dada por  $\nu_{12}$ ; entonces la probabilidad de transición del nivel de energía  $E_1$  hacia el nivel de energía  $E_2$ , estará dada por:

$$P_{12} = B_{12} N_1 \rho(\nu_{12}) \quad (1.6)$$

$B_{12} \rho(\nu_{12}) =$  Probabilidad de absorción por unidad de tiempo.

Por otro lado, en el nivel de energía  $E_2$  existe una cierta población  $N_2$  de átomos o molécula, esto puede decaer de dos maneras:

En forma espontánea, cuya probabilidad es de  $A_{21}$ , donde el número de fotones emitidos esta dada por  $A_{21}N_2$ .

En forma estimulada, aquí se produce con la interacción del campo de radiación de densidad  $\rho(\nu_{12})$ , de la misma manera que como el caso de la absorción.

Por lo tanto para estos dos casos se tiene un número de átomos igual a:

$$P_{21} = A_{21} N_2 + B_{21} N_2 \rho(\nu_{12}) \quad (1.7)$$

Que pasarán del nivel excitado de energía  $E_2$  al nivel de energía  $E_1$ , emitiendo al hacerlo radiación de frecuencia  $\nu_{12}$ .

## 1.2.- Equilibrio térmico.[1][19]

Si el conjunto de átomos se encuentran confinado en equilibrio térmico, a una temperatura  $T$ , entonces las poblaciones  $N_2$  y  $N_1$  de los niveles de energía estarán relacionados según con la ley de S. Boltzmann, y el campo de radiación que interactúa con los átomos tendrá una densidad  $\rho(\nu_{12})$  correspondiente a la del cuerpo negro a la temperatura  $T$ , según la ley de Max Planck.

En equilibrio térmico:

$$B_{12} N_1 \rho(\nu_{21}) = A_{21} N_2 + B_{21} N_2 \rho(\nu_{21}) \quad (1.8)$$

$$[Absorción] = \left[ \begin{array}{c} Emisión \\ Espontánea \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{c} Emisión \\ Estimulada \end{array} \right]$$

Despejando  $\rho(\nu_{21})$ :

$$\rho(\nu_{21}) = \left( \frac{A_{21} N_2}{B_{12} N_1 - B_{21} N_2} \right) \Rightarrow \rho(\nu_{21}) = \frac{\left( \frac{A_{21}}{B_{21}} \right)}{\frac{B_{12}}{B_{21}} \left( \frac{N_1}{N_2} \right) - 1}$$

La Relación de Boltzmann..

$$k = \text{constante de Boltzmann.} \quad \frac{N_1}{N_2} = \exp\left( \frac{E_2 - E_1}{KT} \right) \quad (1.9)$$

Entonces:

$$\rho(\nu_{21}) = \frac{\left( \frac{A_{21}}{B_{21}} \right)}{\frac{B_{12}}{B_{21}} \left( e^{\frac{E_2 - E_1}{KT}} \right) - 1}$$

Como:

$$\rho(\nu_{12}) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{\left( e^{h\nu/KT} \right) - 1}$$

$$\text{Tendremos:} \quad \frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} h\nu = 8\pi h \frac{\nu^3}{c^3} \quad (1.10)$$

De las relaciones anteriores se llega a que  $B_{21} = B_{12}$

Entonces: La probabilidad de emisión estimulada dada por  $B_{21}$  esta relacionada a la probabilidad de emisión espontánea  $A_{21}$  por la siguiente relación:

$$B_{21} = \left( \frac{c^3}{8\pi h \nu^3} \right) A_{21} \quad (1.11)$$

Ahora como:  $\mathcal{W}_{21} = B_{21} \rho(\nu_{21})$

$$\mathcal{W}_{21} = \left( \frac{c^3}{8\pi h \nu^3} \right) A_{21} \rho(\nu_{21}) \quad (1.12)$$

Entonces

$$\mathcal{W}_{21} = A_{21} q(\nu_{21}):$$

$$q(\nu_{21}) = \frac{\mathcal{W}_{21}}{A_{21}} = \left( \frac{c^3}{8\pi h \nu^3} \right) \rho(\nu_{21}) \quad (1.13)$$

Donde  $q(\nu_{21})$  representa al número de fotones por modo propio del sistema.

Ahora; de las relaciones anteriores se deduce lo siguiente. Por el hecho

que  $\left( \frac{c^3}{8\pi h \nu^3} \right)$  es la densidad modal entre la unidad de volumen e

intervalo de frecuencia  $d\nu$ , se obtiene  $\left( \frac{c^3}{8\pi h \nu^3} \right) \rho(\nu_{12}) > 1$  fotones por

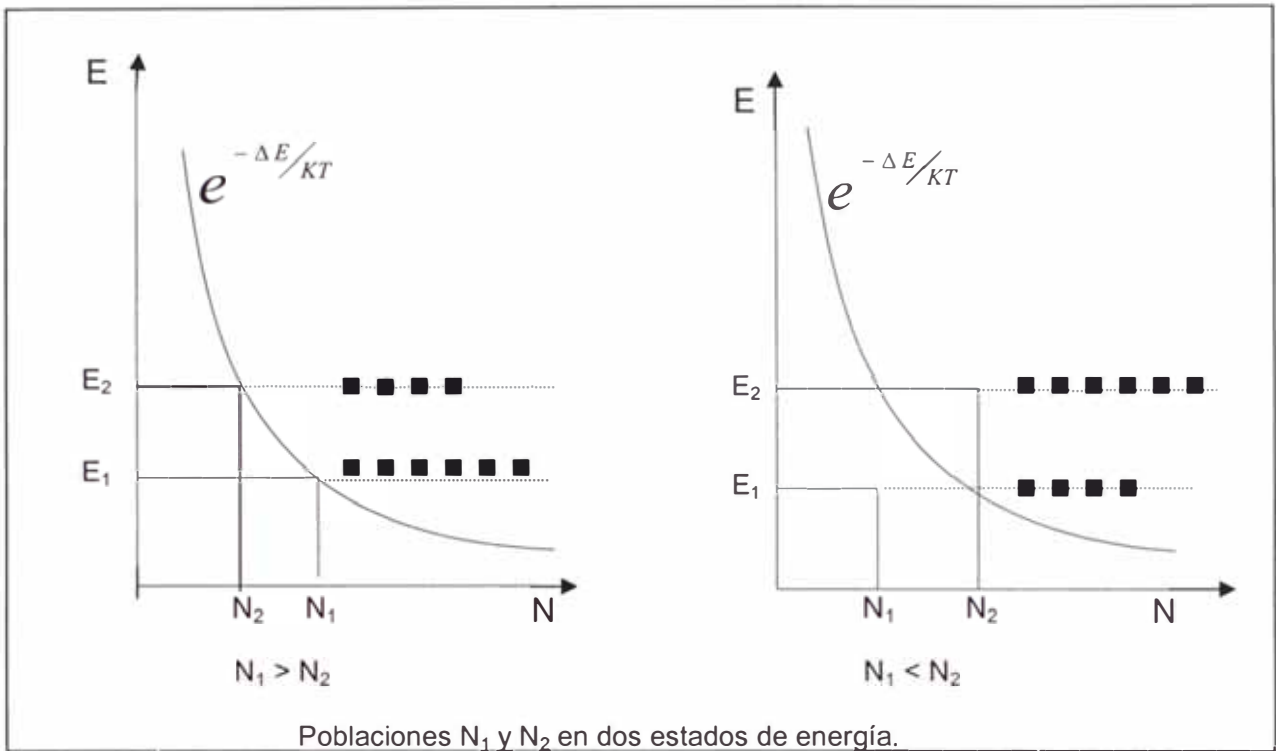
modo o, en otras palabras la emisión inducida de un modo siempre es más grande que la emisión espontánea, cuando el campo inductivo en este modo contiene más de un fotón.

$\mathcal{W}_{21}$  : Probabilidad de emisión estimulada.

$A_{21}$  : Probabilidad de emisión espontánea.

$$\left( \frac{c^3}{8\pi h \nu^3} \right) \rho(\nu_{12}) > 1 \quad \text{Emisión estimulada.}$$

$$\left( \frac{c^3}{8\pi h \nu^3} \right) \rho(\nu_{21}) < 1 \quad \text{Emisión espontánea.}$$



Poblaciones  $N_1$  y  $N_2$  en dos estados de energía.

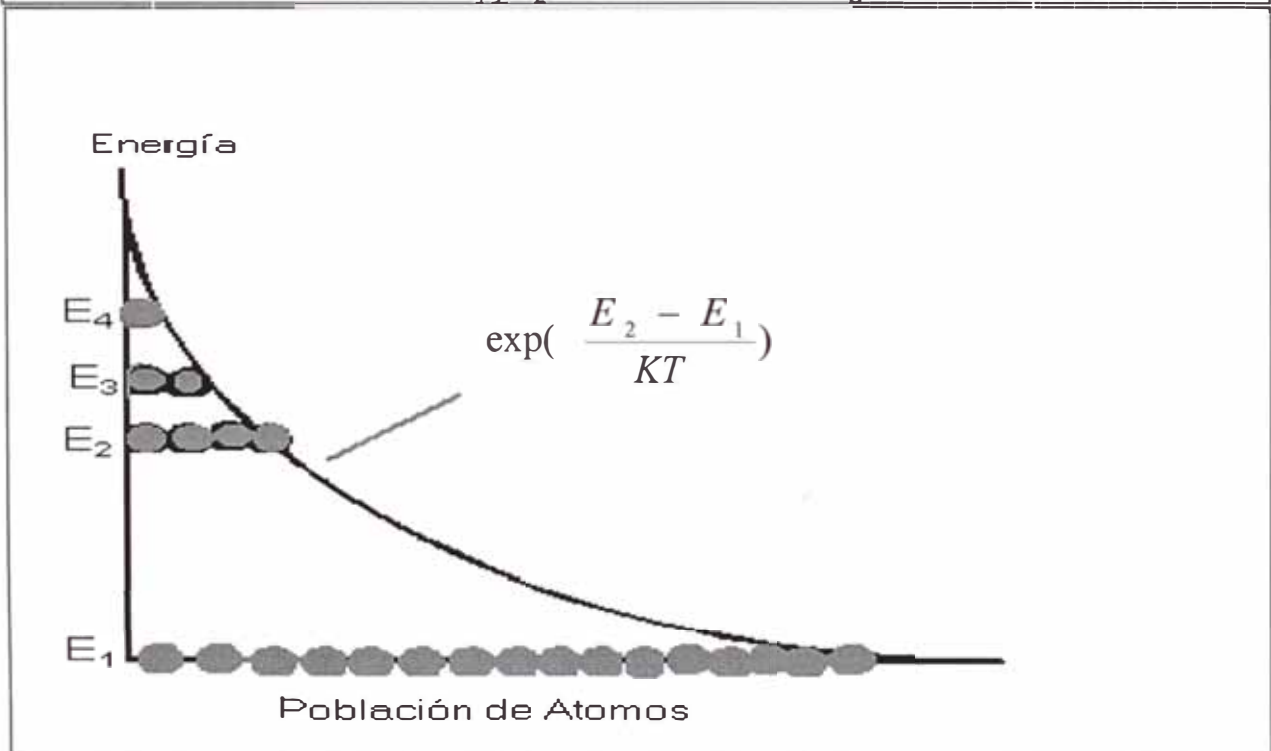


Fig. 1.4 Distribución de los átomos de un gas en equilibrio térmico según la distribución de Stefan Boltzmann.

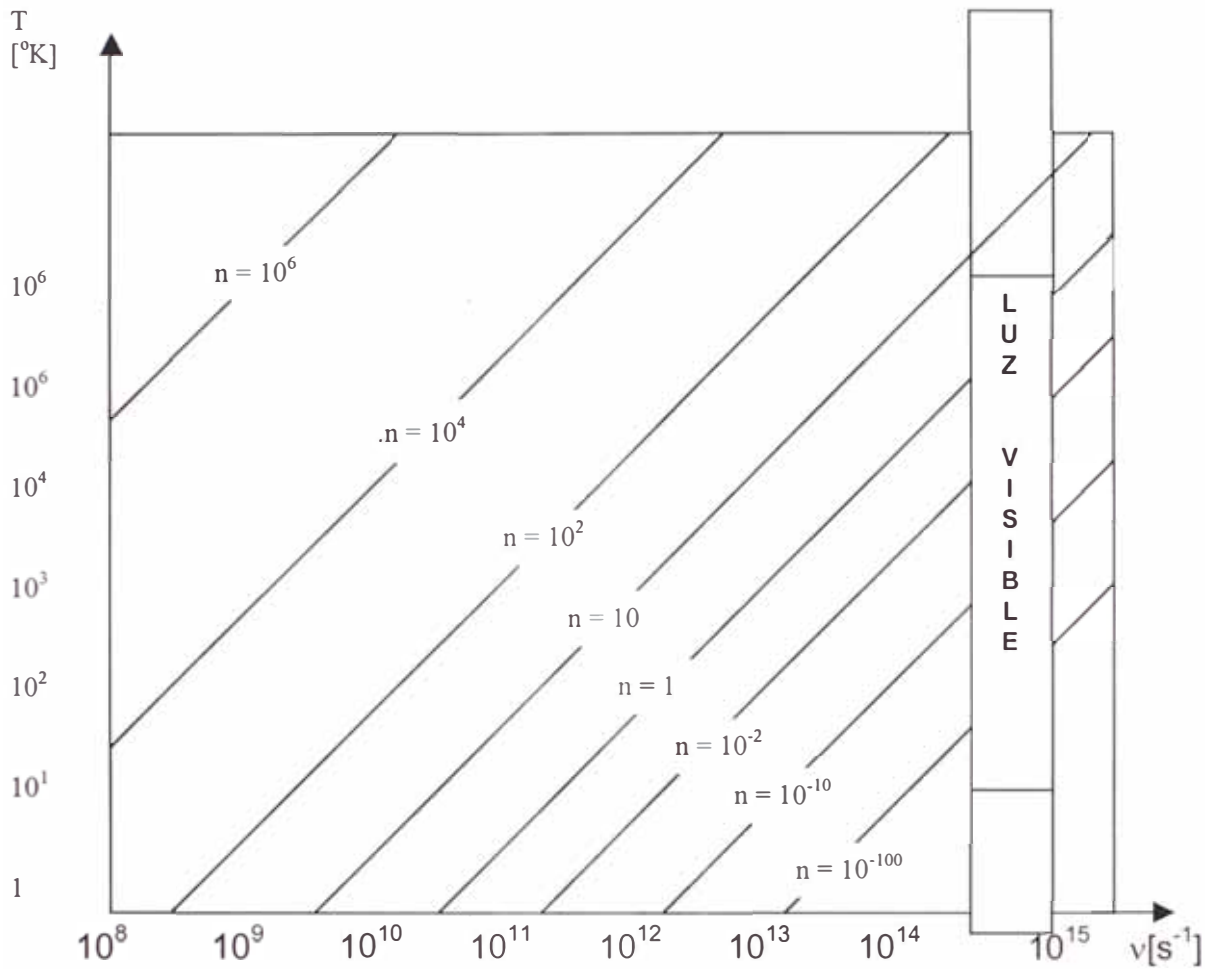


Fig. 1.5 Número promedio de fotones por modo en equilibrio térmico como función de la temperatura  $T$  y la frecuencia  $\nu$ .

En la figura 1.5 se observa el número promedio por modo de un campo de radiación térmica dependiente de diferentes temperaturas. En el campo visible y con temperaturas alcanzables, este número es mucho menor que uno, entonces la meta es buscar la concentración de la energía de radiación en pocos modos lo que favorece la producción de emisión inducida que a su vez es el principio sobre el cual se fundamenta el principio de función del láser.[1]

### 1.3.- La inversión de población.

En el equilibrio termodinámico de S. Boltzmann la ecuación nos muestra que;  $N_1 > N_2 > N_3$  así, los números de átomos poblados en niveles más altos son más pequeños que en los niveles más bajos. Esta situación se llama **población normal** (figura 1.6). En una situación de población normal un fotón que choca con el material ( moléculas de gas) será absorbido, y levanta a un átomo a un nivel más superior. Poniendo la energía necesaria al sistema de átomos, se puede lograr una situación de “**Inversión de la población**”. En la inversión de la población, por lo menos, uno de los niveles de energía más altos tiene mayor cantidad de átomos que el de un nivel de energía más bajo.

Un ejemplo se describe en Figura 1.6. En esta situación hay más átomos ( $N_3$ ) en un nivel de energía más alto ( $E_3$ ), que el número de átomos ( $N_2$ ) en un nivel de energía ( $E_2$ ) más bajo.

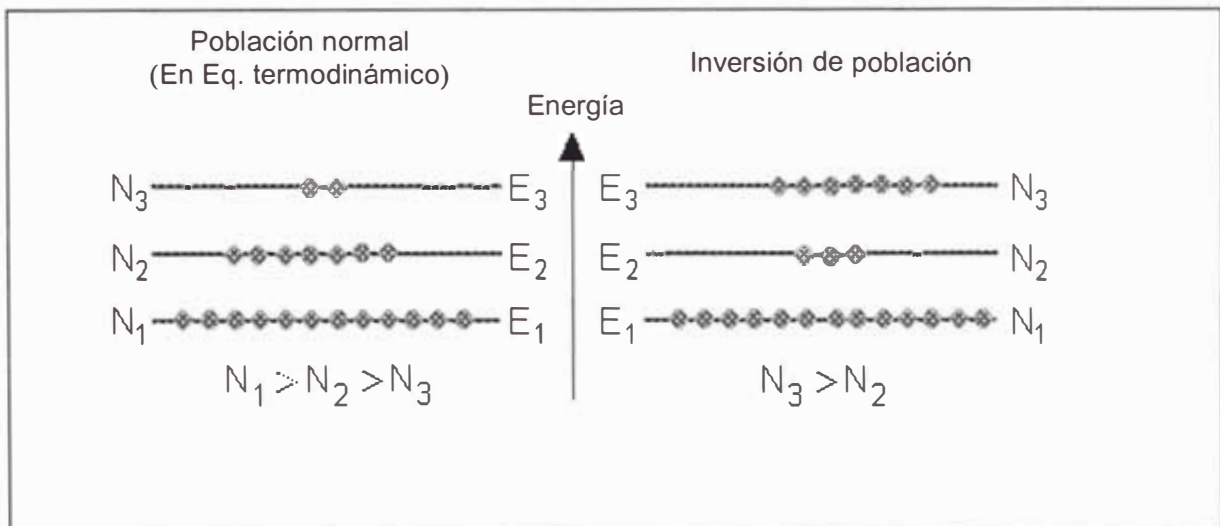


Fig. 1.6 “Población normal” comparado con una “Inversión de la población”.

Este es una de las condiciones necesarias para producir el láser. El proceso de levantar el número de átomos excitados se llama "Bombeo". Si este proceso se hace por la excitación óptica (luz electromagnética), se llama "Bombeo Óptico."



#### **1.4.- Mecanismos de excitación (bombeo).[20]**

Cuando un medio (gaseoso) absorbe energía necesaria; los átomos presentes se excitan desde su estado electrónico fundamental a niveles electrónicos superiores, produciéndose una inversión de población; a este hecho se les denomina mecanismo de excitación. Tenemos algunos mecanismos de excitación:

##### **1.4.1.- Bombeo óptico (excitación óptica).**

Consiste en excitar una solución mediante un haz de luz láser o lámparas de flash con suficiente energía, que permitirá la absorción de dicha energía para producir una posible inversión de población. Generalmente los láseres producidos por excitación óptica, están los cristales que contienen pequeñas cantidades de elementos de transición, tierras raras o elementos actínidos que presentan fluorescencias nítidas.

En los láseres con medio activo sólido o líquido, es común proveer la energía de la excitación en una forma de radiación electromagnética (fotones) que se absorben en el medio activo. La fuente electromagnética de la radiación puede estar de diversas clases:

- Las lámparas de destello, que son estructura de un tubo del cuarzo que se llenaron con gas a presión baja. El gas del Xenón se utiliza generalmente, pero a veces cuando se requiere una energía más alta, se puede usar otro gas noble con pesos atómicos más bajos tales como Kriptón o el Helio.
- Otro láser o cualquier otra fuente de luz tal como la luz del sol.

##### **1.4.2.- Bombeo por impacto electrónico (excitación electrónica).**

Este tipo de excitación está relacionado con un circuito de descarga (para este caso, el circuito Blumlein), la potencia que se puede obtener del sistema es muy grande, lo suficiente para producir una avalancha electrónica que permite la excitación y permitir una inversión de población del medio (por lo general gas molecular), donde el tiempo de absorción del pulso electrónico de excitación debe llevarse a cabo en un lapso menor que  $10^{-8}$  segundos.

Las especies excitadas como ya vimos, se relajan al estado fundamental (energía de nivel cero  $E_0$ ) liberando su exceso de energía como fotones (haz de luz). Ver anexo C.

### 1.4.3.- Excitación eléctrica de un gas:

Similar del caso b. Cuando el medio activo está en estado gaseoso, la mejor excitación es por la descarga eléctrica del gas.

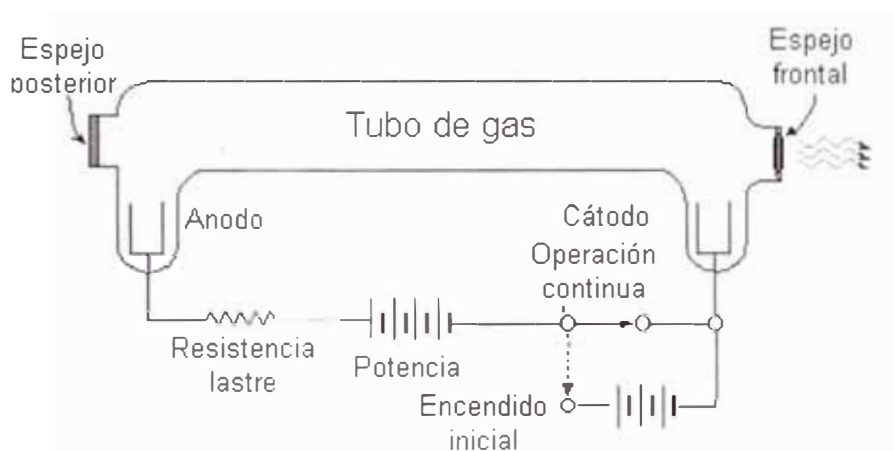


Fig.1.7 Excitación eléctrica de un láser gaseoso[20]

El gas en el tubo es eléctricamente neutro, y mientras no se aplica ninguna energía externa, la mayoría de las moléculas están en el estado fundamental. Cuando se aplica el alto voltaje eléctrico, los electrones se lanzan del cátodo y se aceleran hacia el ánodo. A su manera, estos electrones chocan con las moléculas del gas y la transfiere energía a ellas. Así, las moléculas del gas se levantan al estado excitado. El resistor del lastre se utiliza para limitar la corriente en el tubo después de que se alcance la descarga.

#### **1.4.4.- Colisiones con los átomos.**

Éste es el mecanismo estándar de la excitación en los láseres comerciales del gas por ejemplo: Láser Helio-Neón ó láser del anhídrido carbónico.

En este método por lo menos dos gases están dentro del tubo del láser.

Un gas recibe la energía de la colisión con los electrones libres acelerados. El segundo gas recibe energía de colisiones con las moléculas excitadas del primer gas.

#### **1.4.5.- Excitación química .**

En esta excitación, la energía es provista por la reacción química entre dos átomos o moléculas.

#### **1.4.6.- Corriente eléctrica en láseres del diodo.**

Todos los láseres de diodo están contruidos con materiales semiconductores, y todos muestran propiedades que son características de diodos eléctricos

Por esta razón los láseres de diodo tienen otros nombres como :

- Láseres Semiconductores - de acuerdo con los materiales de los que están compuestos.
- Láseres de Unión - ya que están compuestos por una unión p-n.
- Láseres de Inyección - ya que los electrones son inyectados en la unión mediante la aplicación de un voltaje.

## **CAPITULO 2.**

### **2.- TRABAJO EXPERIMENTAL.**

LASER SUPERRADIANTE ULTRAVIOLETA.

(LASER DE NITROGENO, DE GEOMETRIA PLANAR).

MATERIALES:

#### **Primer módulo:**

- 2 barras de bronce 0.013x0.0752x0.50m.
- 2 láminas de acero inoxidable 0.155x0.65m. y 150 micras de espesor.
- Mylar (dieléctrico) de 50x3 micras de espesor.
- 1 chispero 0.0045x0.034x0.068m.
- 1 resistencia óhmica de 10 MegaOhms.
- Fuente de alto voltaje 0 - 20kV.

#### **Segundo módulo:**

- 2 barras de bronce 0.013x0.0752x1.50m.
- 1 lámina de acero inoxidable 0.155x1.65m. y 150 micras de espesor.
- Mylar (dieléctrico) de 50x3 micras de espesor.
- 1 chispero 0.0045x0.050x0.080m.
- 1 resistencia óhmica de 10 Mega-Ohms.
- Fuente de alto voltaje 0 - 20kV.

## **2.1.- LA CAVIDAD OPTICA:**

### **2.1.1.-Criterios de diseño:**

En este proceso se utiliza un circuito tipo Blumlein para energizar el canal, se requiere de una fuente de alimentación que nos proporcionara la energía necesaria para excitar los átomos dentro de la cavidad. Los láseres de Nitrógeno molecular operan con una presión que va de unos cuantos torr a una presión atmosférica. La existencia de aire en el medio activo, y en particular de oxígeno, inhibe la emisión láser, por lo que es necesario contar con una cavidad bien sellada si se opera a baja presión. Se pueden utilizar cavidades abiertas si se opera el sistema con presiones mayores a la atmosférica, sin embargo, el gasto de gas es entonces muy alto lo que implicaría que la eficiencia del láser sea menor, debido a que hay mayor pérdida de energía con el medio.

### **2.1.2.- Paredes del contenedor:**

El Contenedor (cavidad) fue construido de acrílico debido a la facilidad de su maquinado, procurando que todos los elementos que conforman la cavidad se mantuviesen rígidos, para ello se utilizó pegamento de acrílico líquido, plastilina epóxica y pegamento de silicona. Se enroscan pequeñas prensas en los extremos de la base de la cavidad para poder fijar la tapa. (Fig. 2.8 , 2.9 y ANEXO D: foto 2 )

La ventana de salida del pulso láser es de vidrio cuarzo, el cual permite el paso de luz ultravioleta sin cambio alguno.

### **2.1.3.- Los electrodos:**

Los parámetros variables de los electrodos son su perfil, su longitud, el material del que están hechos y la separación entre ellos. El perfil debe asegurar una distribución lo más homogénea posible de la avalancha de electrones en el medio activo.

Se consideran cuatro parámetros importantes para la elección del material a emplear: a) función de trabajo del material, b) dureza, c) conductibilidad, d) facilidad para maquinado.

- a) Dado que la función de trabajo es la energía necesaria para arrancar un electrón de un determinado metal, entonces requerimos un material cuya función de trabajo sea pequeña. Hemos construido electrodos de bronce que es una aleación constituida principalmente con 80% de cobre y 20% de estaño, con buenas propiedades mecánicas y gran resistencia a la corrosión y al desgaste. El latón que es una aleación constituida fundamentalmente por 70% de cobre y 30% de zinc. Las funciones de trabajo para estos metales son; cobre 4.48 - 4.94 eV y del estaño 4.42 eV. La función de trabajo para el bronce y el latón se considera del mismo orden por ser una aleación de estos dos elementos. [2].
- b) Se necesita metales con cierta dureza para evitar el desprendimiento de partículas durante la descarga eléctrica y así evitar impurezas en la cavidad (sputtering). La dureza de los materiales empleados en escala del 1 al 10 donde el 10 corresponde al carbón, son para el cobre de 2.5 a 3.0, para el estaño de 2.0 y para el bronce de 3.0 a 4.0.[2].
- c) Claramente también requerimos de un buen conductor, para mantener el mismo potencial a lo largo de todo el electrodo para cualquier frecuencia de descarga. El valor de la resistividad a 20<sup>0</sup> C, es para el cobre de 1.72 micro-Ohms-cm y para el bronce de 7.0 micro-Ohms-cm [2].
- d) Otro parámetro importante es el de tener un material fácil de maquinar, ya que para la fabricación de los electrodos se necesita un acabado muy fino, para poder adecuar el perfil de los electrodos. Tomando en cuenta estos factores se ha usado el bronce y el latón para los electrodos.

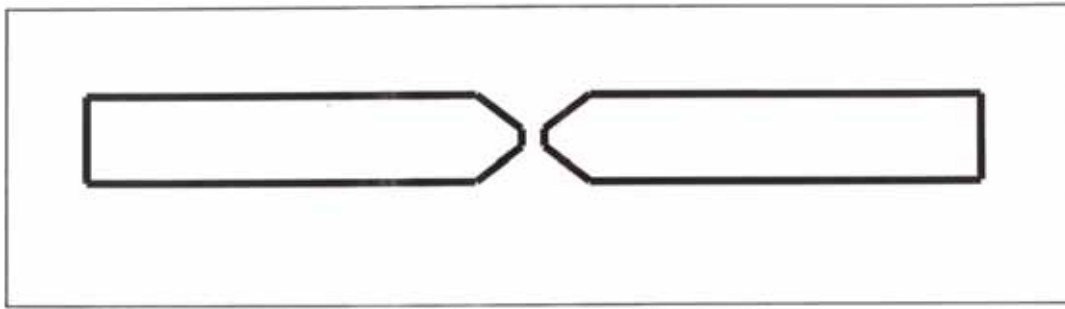


Fig. 2.1 Perfil de los electrodos de bronce (vista frontal).

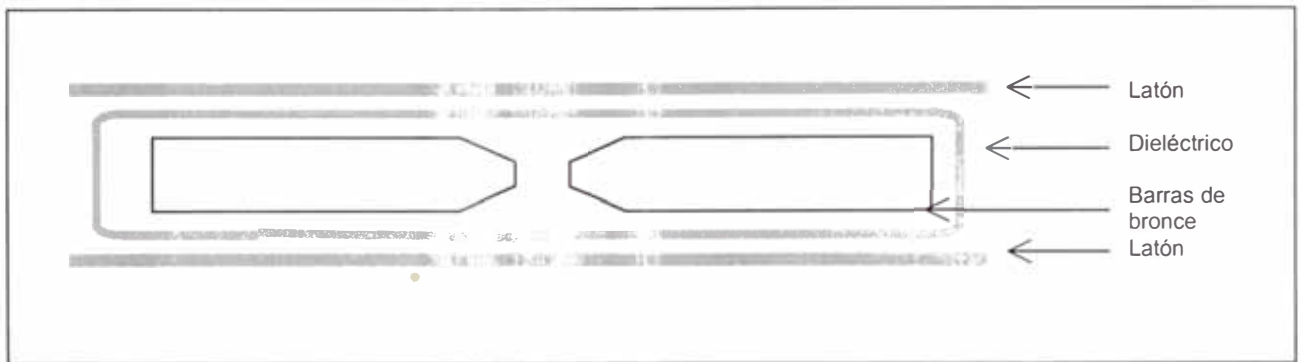


Fig. 2.2 Perfil de los electrodos y los elementos utilizados en la armadura (barras, dieléctrico y latón forman una sola armadura)

#### 2.1.4.- La armadura en el contenedor:

sobre la base del contenedor (caja) se coloca una lamina de acero inoxidable (latón) que junto con el Myler (dieléctrico) y las barras de bronce (electrodos) se formara una armadura (tipo condensador); fig.2.2. Las barras de bronce formará el canal a energizarse, para ello uno de las barras estará conectada al terminal positivo de la fuente de alto voltaje y entre ellas unidas mediante una resistencia óhmica adecuada (ver fig. 2.3).

La emisión del pulso láser, solo es posible si se tiene en cuenta los siguientes detalles:

- a. Las barras de bronce se deben trabajar con mucho esmero; esto se debe hacer con tal cuidado que colocadas las barras una frente a la otra, esta coincida con la imagen especular una de la otra (ver fig. 2.1).
- b. Evitar en lo posible dejar filos pronunciados, para evitar los efectos borde en el momento de la descarga.
- c. La separación entre los electrodos está íntimamente relacionada con el campo eléctrico existente entre los mismos para un voltaje constante de alimentación. A mayor separación tenemos menor campo eléctrico, esto repercute en una menor energía de los electrones lo cual puede generar una inadecuada excitación de las moléculas de nitrógeno por dichos electrones. Por otro lado, si aumentamos la distancia entre los electrodos aumentará el volumen activo involucrado en la descarga generando mayor energía en el pulso de salida. Se busca entonces un balance entre la separación de electrodos y el voltaje aplicado a éstos.
- d. Se debe considerar también la presión de nitrógeno a la que va a operar el láser, ya que esto definirá la trayectoria libre de los electrones.
- e. Al igual que los electrodos (barras de bronce), el disparador (chispero) se prepara de aluminio, teniendo en cuenta que sea regulable (móvil) para variar su distancia al electrodo y que sean capaces de soportar las elevadas descargas a las que son sometidas.



f. La resistencia Ohmica se ha elegido la más alta posible a fin de trabajar con corrientes pequeñas es decir para obtener una alta diferencia de potencial entre los electrodos, para este caso se uso una resistencia de cerámica con un valor nominal de 100 kilo-Ohms.

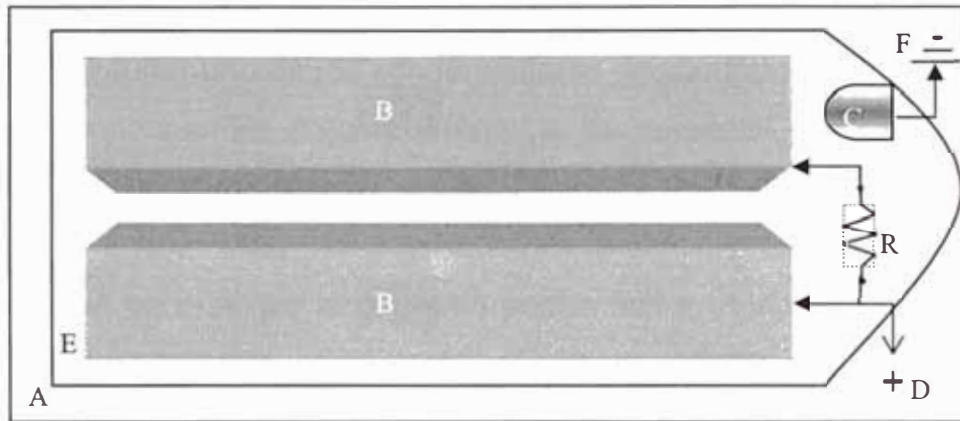


Fig. 2.3 Presentación final de los electrodos para el láser de nitrógeno.

- A: Plancha de latón.
- B: Electrodos de bronce.
- C: Chispero.
- D: Conexión a la fuente 20kV.
- E: Mylar (dieléctrico).
- F: Conexión a tierra de la fuente.

## 2.2.- Operación del láser superradiante UV.

El arreglo que hemos utilizado se llama circuito Blumlein ( fig. 2.4) y consiste en la transferencia resonante de carga entre dos condensadores a través de la cavidad láser. Uno de los condensadores se carga mediante la fuente de alto voltaje rectificado, al tener los dos condensadores una placa común y una unión eléctrica a través de una resistencia, el otro condensador se carga al mismo voltaje. Un interruptor ( chispero de descarga), se usa para cortocircuitar uno de los condensadores descargándolo. En ese momento, el otro condensador ante la diferencia de potencial resultante, transfiere su carga al primero.

Aunque en principio la corriente podría fluir a través de la resistencia, pero, esta se comporta como una impedancia infinita debida a la rapidez del proceso, por lo cual la descarga se conduce a través de los electrodos de la cavidad. Produciéndose así la emisión láser en la dirección frontal; es decir el tren de descargas de uno a otro extremo del canal viajaran a la velocidad de la luz, produciéndose de esta manera un acople entre la emisión y la excitación, esto es generándose emisión estimulada UV, espacialmente concentrada (coherente) la que sale fuera del canal.

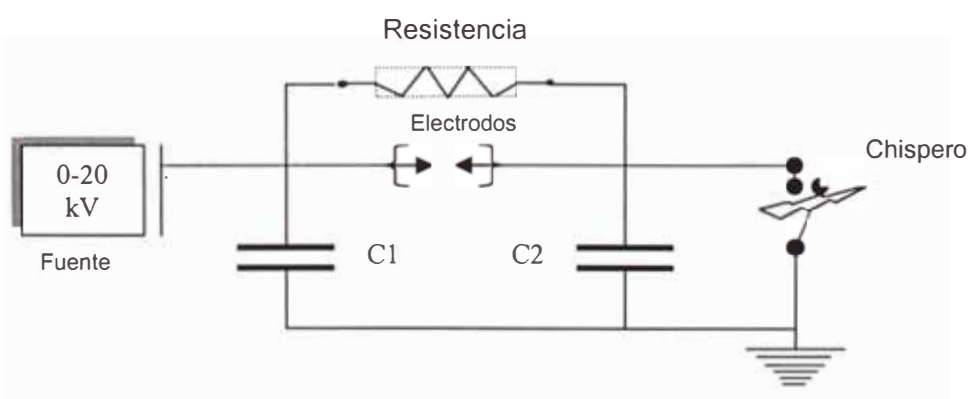


Fig. 2.4 Circuito Blumlein

La forma de operación es simple: Se hace fluir  $N_2$  por la cámara de descarga y se enciende la fuente de alimentación a una tensión típica de unos 15kV. Los electrodos deben estar perfectamente alineados, por que de lo contrario se establecen arcos entre ellos que consumen toda la energía, evitando la amplificación de la radiación. Otra causa de la aparición de arcos, son irregularidades en los electrodos, por lo que se recomienda pulirlos y limpiarlos antes de instalarlos. Debe lograrse una descarga uniforme plana de color violeta que debe verse a través de una lámina de vidrio o algún otro material transparente que absorba el ultravioleta para evitar daños en los ojos. Obtenida esta descarga el sistema ya comienza a funcionar. La forma más simple de visualizar la emisión láser es colocar un papel frente a los electrodos y mirar su fluorescencia, esta emisión se realiza si el papel es fluorescente.

Dado que los láseres utilizan altas tensiones es necesario que los trabajos sean realizados cuidadosamente.

Es importante tener en cuenta que luego de apagarlo la fuente de alimentación del láser, los capacitores continúan cargados, por lo que es necesario descargarlos antes de cualquier otra operación con el mismo.

### **2.2.1.- Manejo del gas en la cavidad.**

Para inyectar gas en la cavidad se requiere de una bomba de circulación esto se logra a través de una bomba de vacío. Se hace las conexiones necesarias de la cavidad con la bomba de vacío y el reservorio del gas nitrógeno. Entre el tanque de nitrógeno y la cavidad se encuentran unas válvulas, con la cual se controlan la cantidad de gas nitrógeno y la presión dentro de ella.

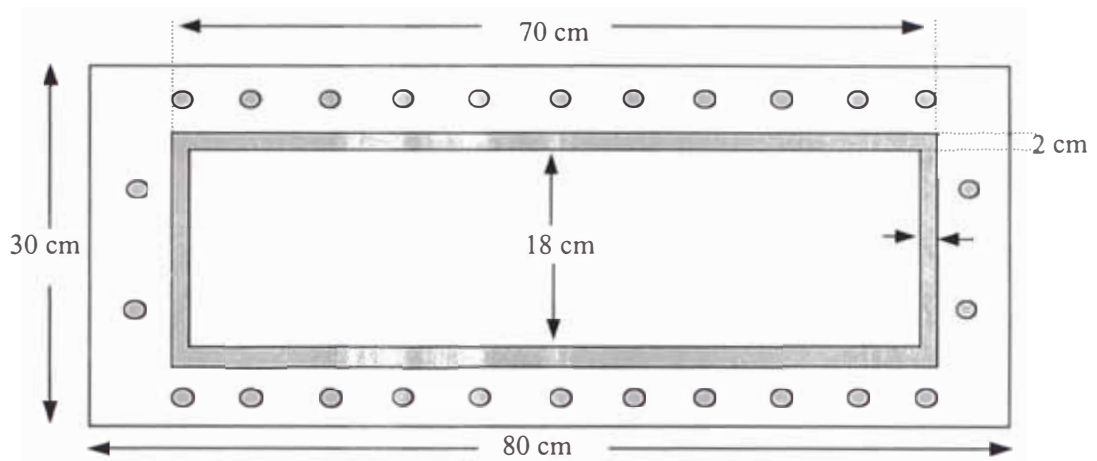


Fig. 2.8.- vista desde arriba del contenedor (cámara)

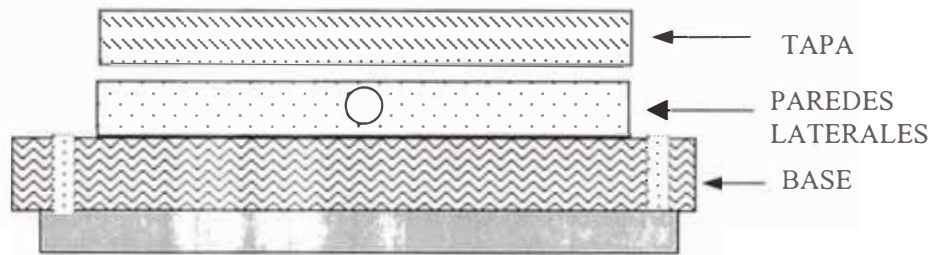


Fig. 2.9.- vista frontal del contenedor (cámara)

### 2.2.2.- Característica del láser.

#### a.- Primer módulo.

Tipo: Láser gaseoso molecular intrínsecamente pulsado.

Presión dentro de la cavidad: 755 mm Hg. Aproximadamente

Frecuencia de emisión: 337.1 nm.

Energía por pulso:  $0.1 \times 10^{-3}$  J

Ancho del pulso: 1 ns (Temporal).

Potencia pico por pulso: 100.06 kW .

Variación de potencia: 10% Aproximado.

Repetición de los pulsos: (Variable).

Sección transversal del pulso: 5 x 10 mm.

(Ver el anexo A).

#### b.- Segundo módulo.

Tipo: Láser gaseoso (aire) intrínsecamente pulsado.

Presión dentro de la cavidad: Igual a presión atmosférica.

Frecuencia de emisión: 337.1 nm. Aproximadamente

Energía por pulso: No medido

Ancho del pulso: 1 ns (Temporal).

Potencia pico: No medido

Variación de potencia: 10% Aproximado.

Repetición de los pulsos: (Variable).

Sección transversal del pulso: 5 x 10 mm.

Para este segundo módulo láser, solo se realizaron las pruebas al aire libre, es decir, se realizaron las pruebas de laseado en el aire sin ninguna cavidad, logrando obtener un pulso láser muy fino (de las mismas características que el primer módulo), dejando su optimización para posteriores trabajos.

### 2.3.- Medida de la energía y potencia del pulso.

**Método calorimétrico:** Para emplear esta técnica se tiene lo siguiente; en una cámara aislada del medio (caja adiabática hecha de tecknopor) se coloca un detector térmico (termistor de 90 Ohms) que absorbe luz incidente (láser UV de nitrógeno), esta energía luminosa es convertida en calor, que hace variar la resistencia del termistor. Estos datos de variación de resistencia se registra mediante un multímetro digital (calibrada hasta  $10^{-3}$  Ohms) durante una cierta cantidad de pulsos láser constantes (ver Anexo A).

$$R = R_0 e^{B/T}$$

$R_0$  y B son constantes que se obtienen de la calibración del termistor.

Para cada resistencia R se tiene una Temperatura T.

Entonces:  $E_c = m.C_e.(T_2 - T_1)$

$E_c$  : Energía calorífica.

$C_e$  : calor específica del agua.

$m$  : masa de 3 gotas de agua.

El termistor está sumergido en 3 gotas de agua destilada que se encuentra depositado en una cubeta de cuarzo UV500, que a su vez lo aislamos con la caja de tecknopor.

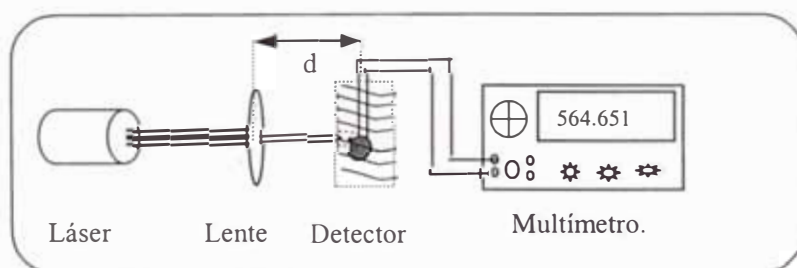


Fig 2.5 Diseño para calcular la Energía y Potencia del pulso Láser.

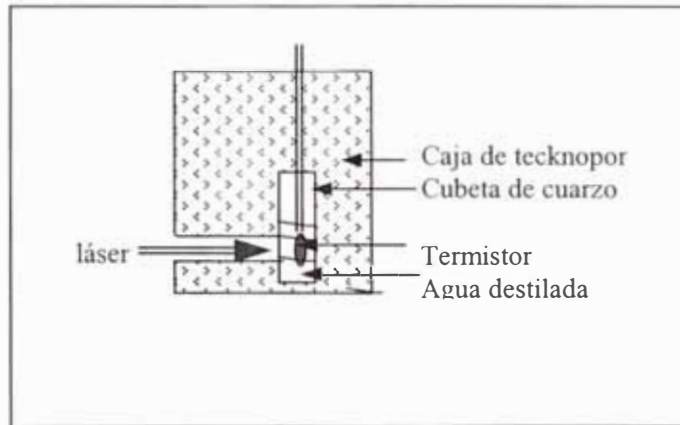


Fig. 2.6 Caja que contiene la cubeta de cuarzo

#### 2.4.- Pulso láser en el osciloscopio del primer módulo.

La señal (energía) de los pulsos del láser superradiante de nitrógeno se llevó al osciloscopio; utilizando para ello un detector hecho de un trocito de celda solar ( celda monocristalina de un panel solar), conectado mediante cables de cobre N° 16 (mellizos) a un multímetro digital y a un osciloscopio. Con el multímetro digital se logra medir la resistencia promedio del detector (celda solar) obteniendo un valor de  $10^6$  Ohms aproximadamente. Mientras que con el osciloscopio se mide el ancho promedio de pulso láser.

d : distancia a la cual se coloca el detector.

El foco de la lente es de 10 cm. Aproximadamente.

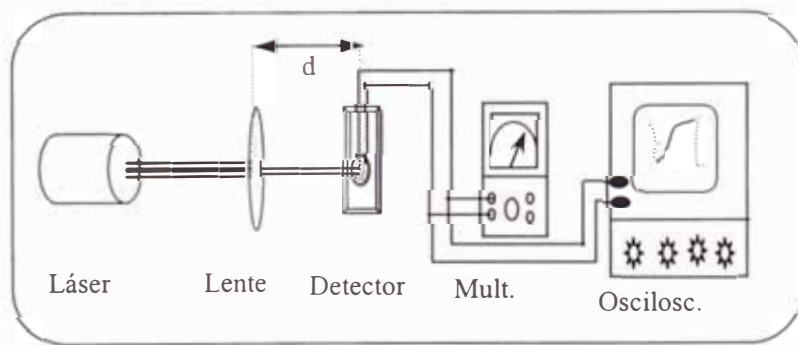


Fig. 2.7 Montaje para obtener observar el pulso láser

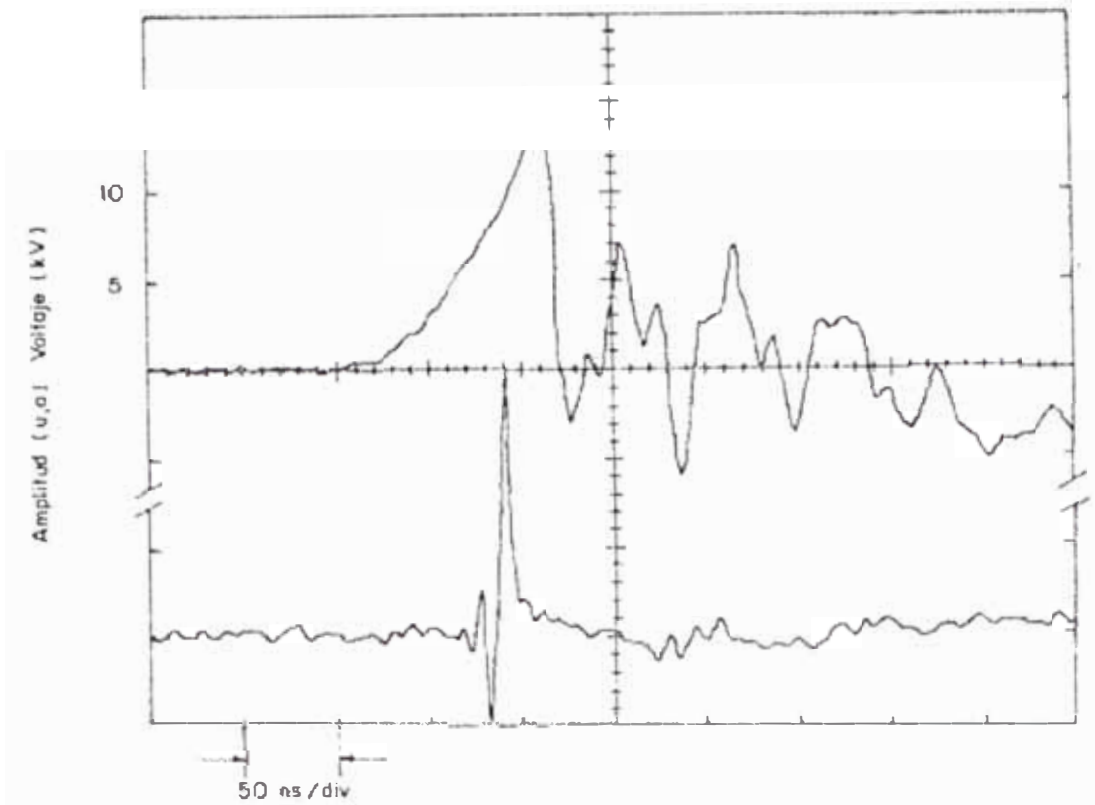


Fig. 2.9 Pulso de Voltaje entre los electrodos y emisión láser.[3]



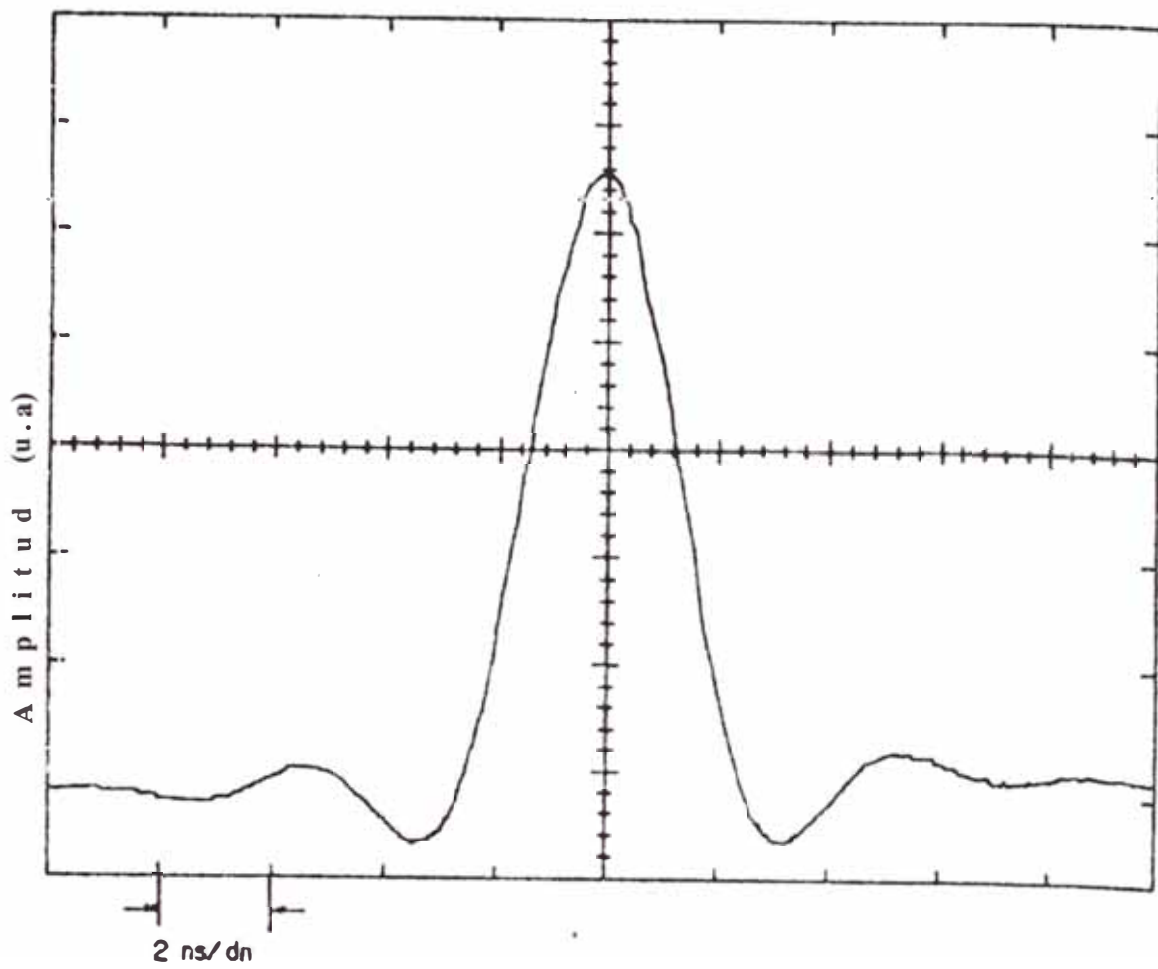


Fig 2.10 Pulso Láser. [3]

## CAPITULO 3.

### 3.- FUNCIONAMIENTO DE ESTE TIPO DE LÁSER.

#### **3.1- Funcionamiento del láser de nitrógeno.**<sup>[16][3]</sup>

Los láseres de gas frecuentemente se subdividen en tres tipos, según su medio activo: atómico, iónico y moleculares. Los sistemas moleculares a diferencia de los atómicos; además de tener niveles energéticos electrónicos principales, poseen subniveles de energía vibracionales y subniveles de energía rotacionales.

- Niveles de energía vibracional son niveles de energía asociados con la oscilación de los átomos en la molécula.
- Niveles de energía rotacional son niveles de energía asociados con la rotación la molécula.

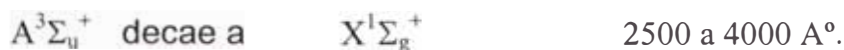
La transición óptica se puede llevar a cabo entre distintos niveles vibracionales, o en diversas combinaciones de ellos.

El nitrógeno atómico tiene siete electrones, dando lugar a una estructura espectroscópica de dobletes; en el nitrógeno molecular, sin embargo, el número de electrones se duplica y siendo entonces un número par, el sistema da lugar a una estructura de singletes y tripletes.

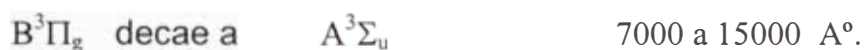
Los efectos láseres observados para el nitrógeno molecular son para dos grupos diferentes de transiciones.

El primer sistema de bandas de emisión es aquel en el que los momentos orbitales de la molécula son cero. ( $^4S$ )( $L=0$ ). La banda de singletes tienen emisiones al estado base en el ultravioleta (UV). La banda de tripletes tiene emisiones en el infrarrojo (IR), en el visible y en el UV que dan lugar a la emisión Fluorescente. [4]

En la fig. 3.1 perteneciente a las curvas de potencial del nitrógeno se tiene:  
 El triplete de menor energía ( $A^3\Sigma_u^+$ ) es obviamente metaestable, pues solo puede decaer al singlete base  $X^1\Sigma_g^+$ , siendo esta una transición fuertemente prohibida:

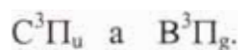


Dentro de este sistema de tripletes está todavía el nivel  $B^3\Pi_g$ .



(Es aquí donde se ha observado radiación Láser en el cercano IR).

El segundo sistema; que corresponde a la transición:



Es aquí donde el momento orbital total de uno de los átomos pasa de  $^4S$  a  $^2D$  ( $L=0$  a  $L=2$ ); en esta se encuentra en el nivel  $C^3\Pi_u$  y este decae al nivel  $B^3\Pi_g$  en una transición de dipolo permitida ( $J=1$  a  $J=0$ ).



(Es pues, en esta transición superradiante que se puede obtener radiación láser UV).

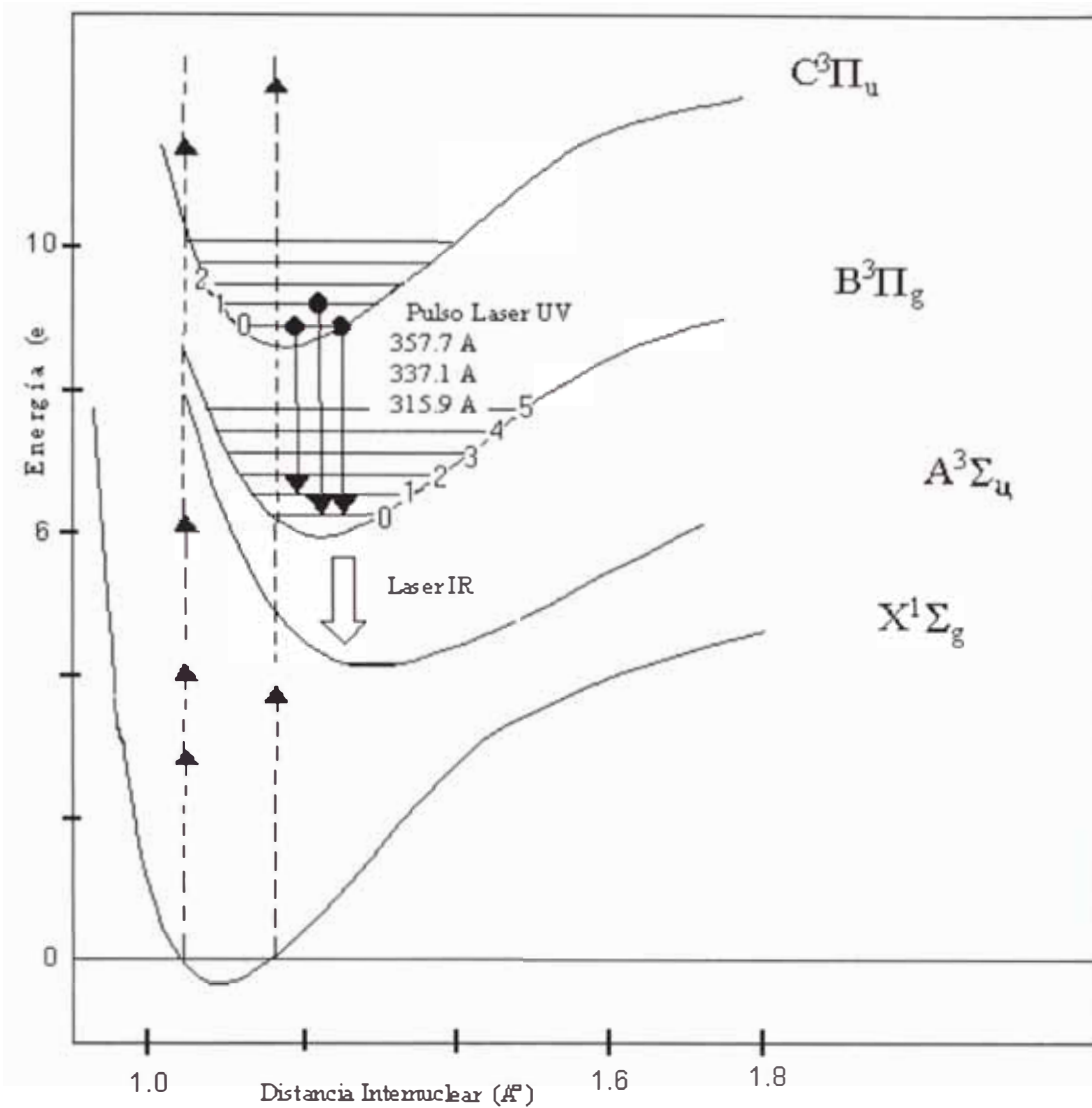


Fig. 3.1 –Curvas de potencial del nitrógeno.

Las emisiones obtenidas para las transiciones no son simultáneas, de hecho hay una diferencia en el tiempo de vida medio  $\tau$  de los distintos niveles en la banda de tripletes. [4]

$$\tau(C^3\Pi_u) = 40 \text{ ns.}$$

$$\tau(B^3\Pi_g) = 8 \text{ a } 10 \text{ } \mu\text{s.}$$

$$\tau(A^3\Sigma_u) = 2 \text{ s.}$$

Debido a que el nivel  $C^3\Pi_u$  tiene menor duración que el  $B^3\Pi_g$ , la transición láser entre estos niveles se autotermina, ya que después de un tiempo del orden de unos 40ns no puede haber inversión de población entre los dos primeros niveles. El resultado es entonces un láser inherentemente pulsado.

Es más las condiciones de excitación óptima (presión, tensión de carga) no son los mismos para las emisiones UV y IR; ya que la potencia de energía creada es diferente.[5].

De acuerdo con estos sistemas es posible dar a conocer con certeza los mecanismos exactos que producen la inversión de población. Entre tanto los electrones presentes en un determinado nivel electrónico son los responsables de la excitación.

### 3.2- CONDICIONES DE EXCITACIÓN DEL NIVEL $C^3\Pi$

Los procesos de excitación provienen de la población del nivel  $C^3\Pi$  .. La figura nos muestra un diagrama cronológico de la excitación para diferentes emisiones de nitrógeno. Que viene a ser la recombinación de Átomos de nitrógeno ( $N_2$ ) con iones de  $N_2^+$ .

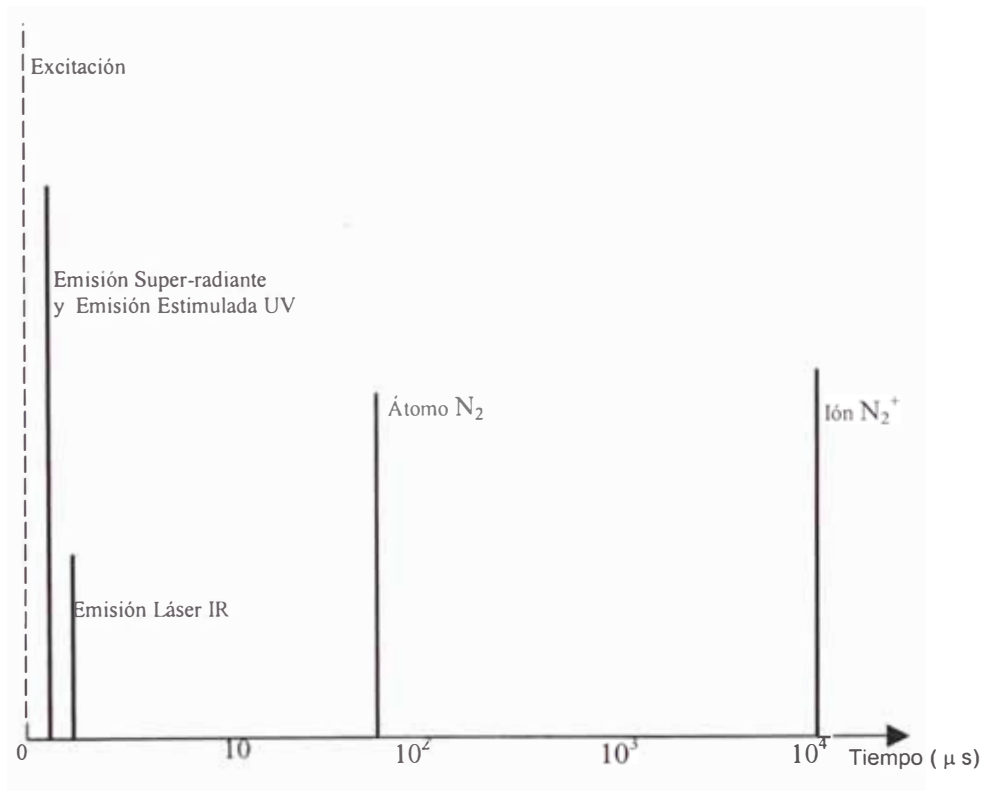


Fig.- 3.2 -Diagrama Cronológico que Representa la Excitación de las Diferentes Emisiones del Nitrógeno en la Recombinación de los Átomos de Nitrógeno y del Ión Nitrógeno

De la figura 3.2 observamos que la recombinación de los átomos de  $N_2$  no puede ocurrir después de 100  $\mu s$  de la descarga; lo que muestra que este proceso no puede intervenir en la excitación del nivel **C**, lo propio sucede de la recombinación de los iones  $N_2^+$  con los electrones que se producen 10ms más tarde.

Algunos mecanismos seleccionados de excitación del nivel **C** son:

- La excitación directa por impacto electrónico.
- La producción indirecta (por un proceso de tipo resonante) de un ion  $N_2^-$  de una corta duración de vida que esta cerca del estado  $C^3\Pi_u$ . La observación de tal ion fue hecha por Schulz ([6]) para una energía de excitación de los electrones de 11,2eV, que atribuye a la excitación del estado  $C^3\Pi_u$ . [7]

Suponemos que los dos niveles del láser  $C^3\Pi_u$  y  $B^3\Pi_g$  son excitaciones por las colisiones inelásticas de las moléculas de  $N_2$  en el estado fundamental con los electrones rápidos; lo que provocan las transiciones verticales de estos dos estados electrónicos según el principio de Frank-Condon.

De acuerdo a este principio, las transiciones más probables, en términos cualitativos, son aquellos que aparecen verticalmente sobre la figura 3.1 (curvas de potenciales), es decir sin variación notable de la distancia internuclear  $r_e$  de la molécula. El dominio de esta excitación es dado por las líneas verticales discontinuas que permite apoyar sobre los extremos del nivel vibracional  $V''= 0$  del estado fundamental. Según estas condiciones la diferencia de las distancias internucleares ( $r_e$ ) del estado **C**, **B** y **X** es:

$$r_e(B^3\Pi_g) > r_e(C^3\Pi_u) > r_e(X^1\Sigma_g^+)$$

Por lo cual la excitación del estado **C** será predominante dentro de los niveles básicos vibracionales ( $V=0,1$  y  $2$ ), considerando que para el estado **B**, esto se vera en los niveles vibracionales más altas.

Cuantitativamente, la probabilidad de excitación de cada nivel vibracional de los estados **B** y **C** a partir del estado  $X^1\Sigma_g^+$  ( $V''=0$ ) es prácticamente proporcional a los factores de Franck-Condon  $Q_{0V'}$ .

Porque los momentos de transiciones electrónicas es relativamente constante con la distancia internuclear para una línea dada, los factores son producto de las mediciones de las secciones eficaces de excitación y de las intensidades de líneas del nitrógeno.[7]

La siguiente tabla muestra las secciones eficaces de excitación de los niveles vibracionales del estado  $C^3\Pi_u$  a partir del estado  $X^1\Sigma_g^+$  ( $V''=0$ ), calculados en trabajos hechos por varios autores. [8]

Los valores de las secciones eficaces de excitación, a partir de los niveles vibracionales del estado fundamental  $V''=0$  hacia los niveles  $V'=0, 1, 2$  y  $3$  del estado **C** considerados son los mismos que los obtenidos a partir del nivel  $V''=0$ . [8]

La suma de las secciones eficaces  $Q_{00}, Q_{01}, Q_{02}, Q_{03}$  y  $Q_{04}$  forman un valor aproximado de las secciones eficaces total de excitación del estado  $C^3\Pi_u$ . Este valor de  $15 \times 10^{-18} \text{cm}^2$  se acerca mucho a los valores experimentales encontrados por Zapesochnyi y Coll. [15]

Sec. Eficaz $Q'_{0V'} (10^{-18} \text{cm}^2)$	V' Del estado C					
	0	1	2	3	4	
sección Eficaz	6.2	4.6	1.9	1.7	0.2	[8]Steward
		2.4	2.0	2.0	0.1	[8]Nicholls
		1.6	1.6	0.7	0.3	[8]Pillow

Secciones eficaces de excitación de los niveles vibracionales del estado  $C^3\Pi_u$  del nitrógeno a partir del estado fundamental  $X^1\Sigma_g^+$  ( $V''=0$ ), para una energía de electrones de 35eV.

Los valores de las secciones eficaces  $Q_{0V'}$  de los diferentes niveles vibracionales del estado **B** son dados en la siguiente tabla, para una excitación a partir del nivel  $V''=0$  del estado fundamental  $X^1\Sigma_g^+$ . [9]

Tabla de las secciones eficaces de excitación de los niveles vibracionales del estado  $B^3\Pi_g$  a partir del estado fundamental  $X^1\Sigma_g^+$  ( $V''=0$ ).

Niveles del estado <b>B</b>	$V'$										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$Q_{0V'} (10^{-18}\text{cm}^2)$	1.8	4.5	6.5	7.1	7.1	4.8	3.6	2.0	1.2	0.9	0.6

Si bien la sección eficaz total del estado **B** es más grande que la del estado **C** para todas las energías (ver fig. 3.3), comparando las dos tablas anteriores, las secciones eficaces de ciertos niveles vibracionales del estado **C** son más grandes que de algunos niveles vibracionales del estado **B**.

$$Q_{00}[C^3\Pi_u] = 6.2 \times 10^{-18} \text{cm}^2 \quad (\text{es mayor que}) \quad Q_{01}[B^3\Pi_g] = 4.5 \times 10^{-18} \text{cm}^2$$

$$Q_{00}[C^3\Pi_u] = 6.2 \times 10^{-18} \text{cm}^2 \quad (\text{es mayor que}) \quad Q_{00}[B^3\Pi_g] = 1.8 \times 10^{-18} \text{cm}^2$$

De otra parte:

$$Q_{01}[C^3\Pi_u] = 3.5 \times 10^{-18} \text{cm}^2 \quad (\text{es mayor que}) \quad Q_{00}[B^3\Pi_g] = 1.8 \times 10^{-18} \text{cm}^2$$



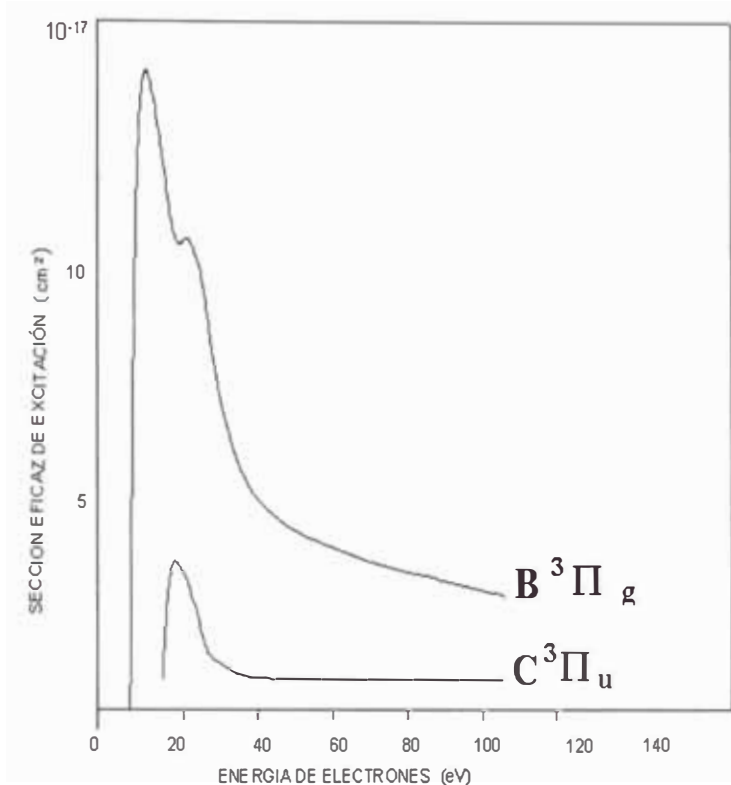
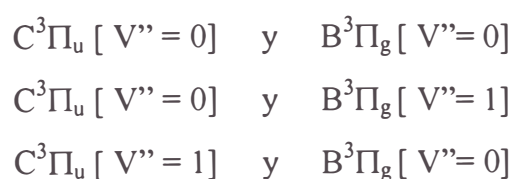


Fig 3.3 – Función de excitación de los estados electrónicos B y C del nitrógeno.

Entonces, las secciones eficaces máximas de excitación de los niveles  $C^3\Pi_u$  y  $B^3\Pi_g$  respectivamente, sugeriría la imposibilidad de obtener inversión de población por medio de impacto electrónico, pues el nivel de emisión láser tiene una sección menor que el nivel al que decae. Se ha sugerido sin embargo, que es necesario considerar los niveles vibracionales particulares dentro de cada transición, lo cual ha sido calculado utilizando los factores de Franck-Condon cuyo resultados se muestran en las dos tablas anteriores. Puede notarse entonces, a pesar de que la inversión de población global entre los niveles no es posible que se pueda lograr una inversión de población entre los niveles vibracionales siguientes:



La probabilidad relativa de emisión del sistema  $C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$  es directamente proporcional al producto de la sección eficaz de excitación  $Q_{0v'}$  de los diferentes niveles del estado **C** para los factores de Franck-Condon  $q_{v'v''}$  de la emisión  $C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$ .

Los valores de  $q_{v'v''}$  para las transiciones consideradas son dados en la tabla.

Estado superior $v'$ C	$v''$ estado inferior B					
	0	1	2	3	4	5
0	0.449	0.329	0.147	0.052	0.016	0.005
1	0.390	0.019	0.204	0.200	0.112	0.048
2	0.135	0.322	0.033	0.060	0.161	0.143
3	0.024	0.252	0.163	0.118	0.002	0.089
4	0.002	0.070	0.303	0.048	0.157	0.014

Factores de Franck-Condon para el sistema segundo positivo del nitrógeno  $C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$ .

Esta tabla muestra los valores más grandes de los factores de Franck-Condon en las transiciones ya mencionadas; que son:

$V' = 0$	a	$V'' = 0$	[0.449]
$V' = 1$	a	$V'' = 0$	[0.390]
$V' = 0$	a	$V'' = 1$	[0.329]
$V' = 2$	a	$V'' = 1$	[0.322]
$V' = 4$	a	$V'' = 2$	[0.303]

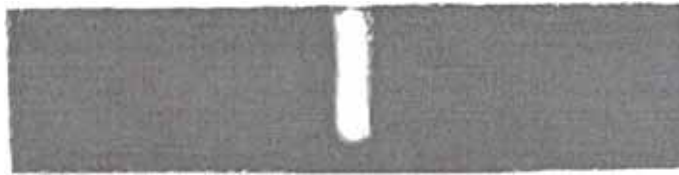
Multiplicamos estos valores  $q_{v'v''}$  por la sección eficaz de excitación  $Q_{0v'}$  de cada nivel vibracional respectiva, obtendremos los productos  $(q_{v'v''}) \cdot (Q_{0v'})$  que representan las probabilidades de transiciones.

Así las transiciones más probables para estas transiciones son:

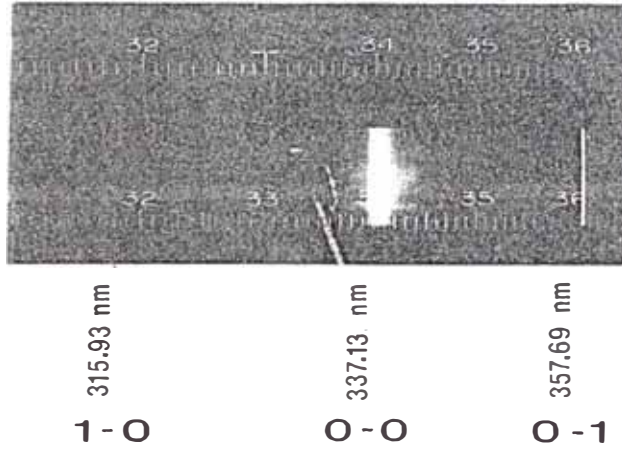
$$\begin{array}{lll} v' = 0 \rightarrow v'' = 0 & (0.8082) \times 10^{-18} \text{cm}^2 \\ v' = 0 \rightarrow v'' = 1 & (0.5922) \times 10^{-18} \text{cm}^2 \\ v' = 1 \rightarrow v'' = 0 & (1.7550) \times 10^{-18} \text{cm}^2 \\ v' = 0 \rightarrow v'' = 2 & (0.2646) \times 10^{-18} \text{cm}^2 \end{array}$$

De acuerdo a los factores de Franck-Condon y las probabilidades de transición, se han observado transiciones láser en los tres casos en longitudes de onda:

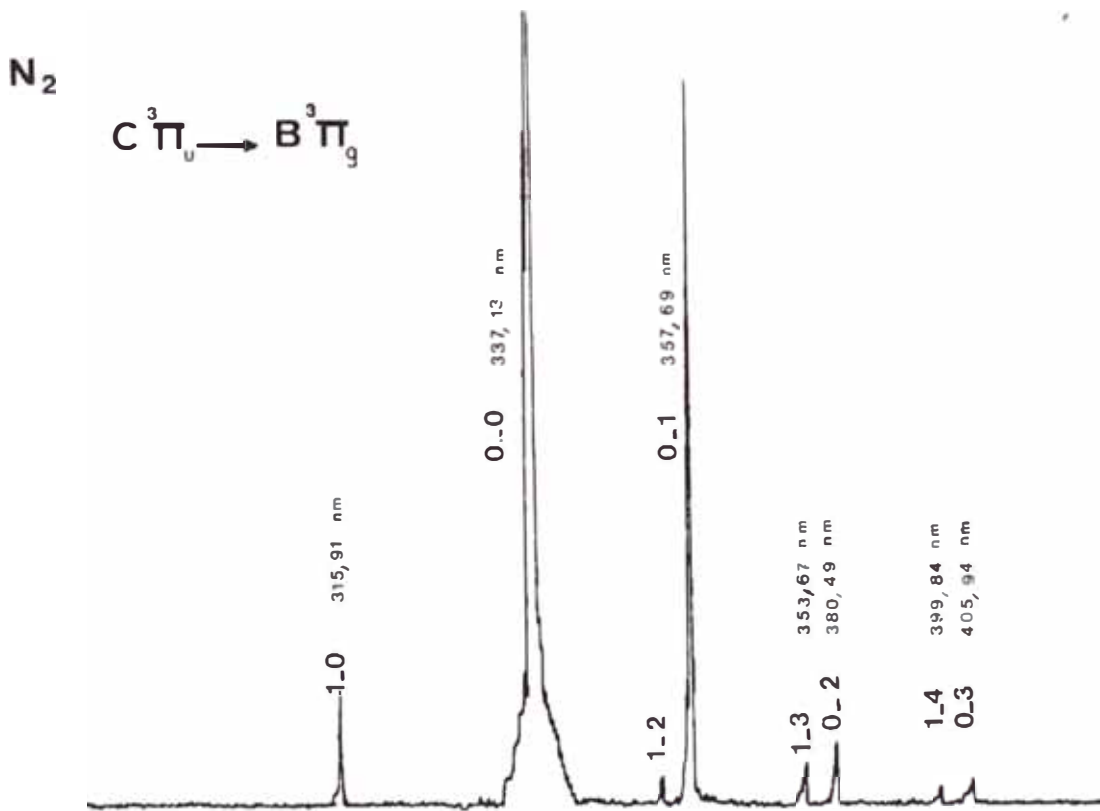
$$\begin{array}{ll} v' = 0 \rightarrow v'' = 0 & [\lambda = 3371 \text{ \AA}] \\ v' = 1 \rightarrow v'' = 0 & [\lambda = 3159 \text{ \AA}] \\ v' = 0 \rightarrow v'' = 1 & [\lambda = 3577 \text{ \AA}] \end{array}$$



Registro del Pulso en una cámara oscilográfica.[M]



Espectro del láser de Nitrógeno, obtenida en un espectrógrafo de prisma [mm].



Registro microdensimétrico del espectro de emisión láser del Nitrógeno.[M]

## **CAPITULO 4.**

### **4.- LASER DE COLORANTE.**

#### **4.1- Láser Pulsado de Colorantes.**

Un láser de colorante se puede considerar como un dispositivo especial para convertir la radiación electromagnética de una longitud de onda, en otra longitud de onda que se puede sintonizar.

La salida de un láser de colorante es siempre radiación coherente sintonizable en una región específica del espectro, determinada por el material colorante.

Los láseres de colorantes se caracterizan por emplear como medio activo moléculas orgánicas en solución que, en la mayoría de los casos, son excitados ópticamente por lámparas de flash o por sistemas láseres pulsados o continuos. La propiedad más importante es que la emisión estimulada puede ser sintonizada sobre toda la banda de emisión del colorante. La emisión láser se produce en transiciones de fluorescencia de estas moléculas que, en general, tienen espectros anchos y continuos. [10]

Si bien existe una variedad de láseres sintonizables, los de colorantes son por muchas razones las más versátiles, ya que poseen una elevada ganancia, lo que permite operarlos con longitudes activas muy cortas, con factores de amplificación muy elevadas (hasta unos  $10^8$ ) cuando son utilizados como amplificadores. Dado que el medio activo es un líquido, le otorga una serie de ventajas tales como: facilidad de operación; posibilidad de hacer fluir el colorante para evitar los efectos de calentamiento y descomposición; recambio fácil y su bajo costo inclusive.

Si se adoptan convenientemente las cavidades ópticas, es posible canalizar toda la energía de emisión de una banda muy angosta de longitud de onda, del orden de un ancho de línea atómica, sintonizable y de elevada potencia. La gran variedad de colorantes desarrollados por los métodos de síntesis química orgánica, permiten obtener emisión sintonizable en cualquier parte del espectro (355 – 1018 nm) para el bombeo de láseres de  $N_2$ . [11]

#### 4.2.- Medio Activo en el láser de Colorante.

Las moléculas de colorante son normalmente grandes moléculas orgánicas fluorescentes que contienen un gran número de estructuras cíclicas.

El medio activo en un láser de colorante está compuesto por moléculas coloreadas disueltas en un líquido, que es normalmente un tipo de alcohol. Debido a la interacción de las moléculas coloreadas con el disolvente, se produce un ensanchamiento de los niveles de energía vibracional. Por consiguiente, se forma un espectro de bandas anchas.

Las disoluciones de moléculas orgánicas coloreadas tienen bandas de emisión y de absorción anchas. En las figuras 4.14 y 4.15 pueden verse un ejemplo de las bandas espectrales de un colorante común, la Rodamina B (6G) disuelto en alcohol metanol.

#### 4.3.- Características de un colorante.

La molécula del colorante, en su estado normal y los estados excitados tienen varios subniveles vibracionales y rotacionales, de donde se observa que la diferencia de energía entre los subniveles vibracionales es mayor que entre los subniveles rotacionales.

A temperatura ambiente, la mayoría de las sustancias se encuentran prácticamente en el subnivel vibracional más bajo  $GV_0$  del estado normal (fundamental) pero no necesariamente en el subnivel rotacional más bajo.

En el equilibrio térmico la proporción de población del primer estado excitado con respecto al estado normal puede calcularse usando la estadística de S. Boltzmann.

En la figura 4.1 la transición de la izquierda ( $T_{UV}$ ) representa una transición de energía relativamente alta, producida a consecuencia de la absorción de energía radiante ultravioleta. El electrón puede ser promovido a cualquiera de los diversos niveles de rotación o de vibración en el estado electrónico excitado. A menudo, el electrón regresará a un nivel de rotación o de vibración inferior dentro del estado excitado, por una transferencia no radiante, señalada por la línea ondulada.

Una transición ocasionada por la absorción de luz visible marcada como  $T_{VIS}$  en la figura, estará asociada con una transición menor de nivel de energía, porque la luz visible tiene menos energía que la ultravioleta. Por ultimo, una transición en el cual la molécula alcanza niveles de vibración y rotación más altos, está señalada como  $T_{IR}$ . Esta se produce a consecuencia de la absorción de la energía infrarroja, que es de menor energía (y mayor longitud de onda) que el visible o el ultravioleta.[12]

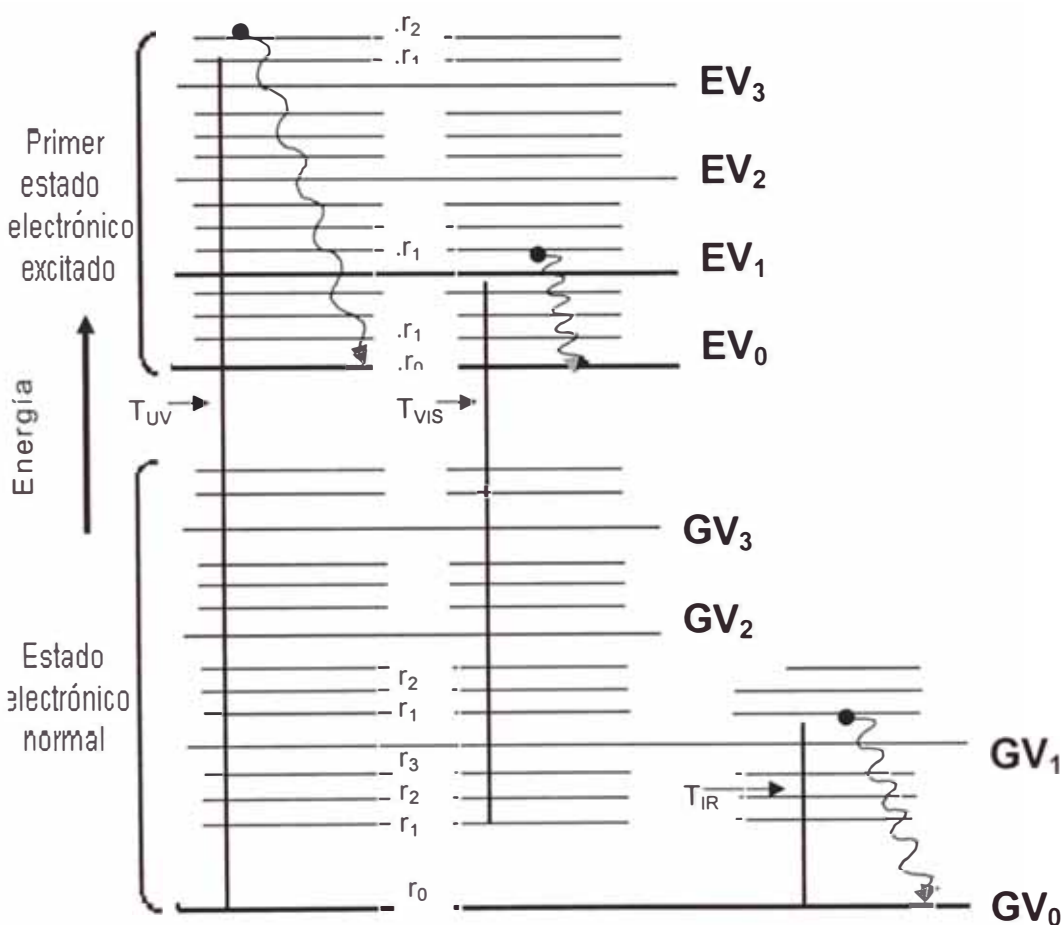


Fig. 4.1 Transiciones características en las cuales hay absorción de luz. Las transiciones  $T_{uv}$  y  $T_{vis}$  son transiciones electrónicas ocasionadas por absorción de luz ultravioleta o visible.  $T_{ir}$  es una transición vibracional ocasionada por transiciones infrarrojas.-

#### 4.4.- Diagrama Simplificado de Niveles de Energía del Láser de Colorante

La estructura de los niveles de energía de las moléculas de un colorante orgánico en un disolvente es muy compleja. La siguiente explicación se basa en un diagrama simplificado de niveles de energía, descrito en la figura 4.2.

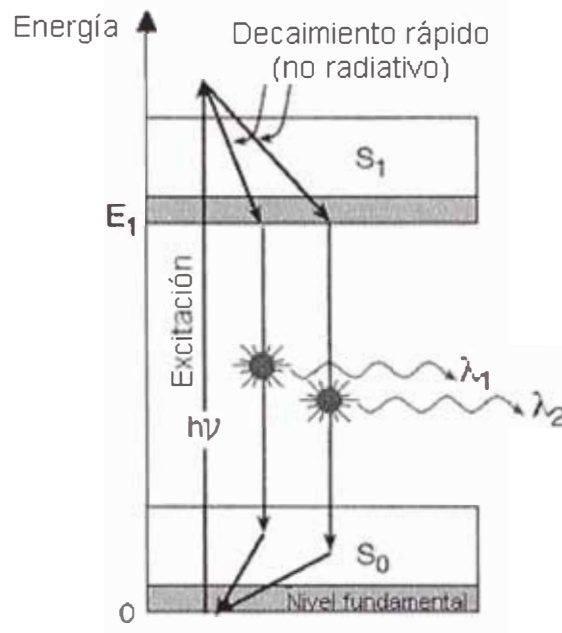


Diagrama Simplificado de Niveles de Energía del Láser de Colorante.

- Fig 4.2 -

La anchura de cada banda de energía es del orden de decenas de electrón\_voltios [eV]. A temperatura ambiente, la energía térmica de la vibración es del orden de 1/40 [eV]. Por lo tanto, sólo estará lleno el nivel de energía más bajo de cada banda (marcado en oscuro en la figura 4.2).

En un tiempo muy corto, del orden de picosegundos, la molécula excitada decae a la banda de energía más baja mediante una transición no radiativa.

En este estado, la molécula puede sufrir una transición láser a cualquier lugar de la banda más baja, y entonces, por medio de una transición no radiativa, decae al nivel fundamental.



#### **4.5.- Tiempo de Vida del Nivel Excitado en el Láser de Colorante.**

Como puede verse en las figuras 4.14 y 4.15, las moléculas del colorante absorben y emiten en un amplio rango espectral. Todas las transiciones de las bandas de energía generan un continuo de longitudes de onda.

El hecho de que la banda de energía sea ancha, provoca que el tiempo de vida del nivel excitado sea muy corto por dos razones:

1. Hay un gran número de posibles transiciones láser.
2. El número de colisiones entre las moléculas en un líquido es muy alto, y la transferencia de energía durante cada colisión provoca un rápido decaimiento del estado excitado.

#### **4.6.- destino de la energía absorbida.**

Después de que las moléculas excitadas han absorbido la energía radiante visible o ultravioleta, no permanecen mucho tiempo en estados electrónicos elevados. Se da un resumen de las formas en que una molécula excitada puede perder energía.

1. La molécula puede emitir un cuanto de luz (fotón) desde el estado excitado, denominado estado excitado apareado en las moléculas orgánicas. Esta emisión se denomina fluorescencia cuando proviene de un estado excitado singlete. (Un estado de singlete es aquel en el cual todos los spines electrónicos están apareados).
2. La molécula puede perder energía en forma de calor por desintegración vibracional, mediante choques con otras moléculas o con las paredes del recipiente. Esto suele llamarse conversión interna o amortiguación de la fluorescencia. Después de efectuarse una inversión de spines, para producir un estado excitado distinto denominado estado triplete (o estado de triplete; es aquel en el cual todos los electrones, con excepción de dos, están apareados por spines) la molécula puede regresar al estado fundamental.

3. Por emisión de un cuanto de luz (fotón). Como esta emisión proviene de un estado excitado de triplete que regresa a un estado fundamental singlete, se denomina fosforescencia. La fosforescencia generalmente solo se observa en estado sólido, como en el caso de soluciones congeladas, en tanto que la fluorescencia se observa tanto en soluciones como en estado sólido.
4. Por desactivación no radiactiva.

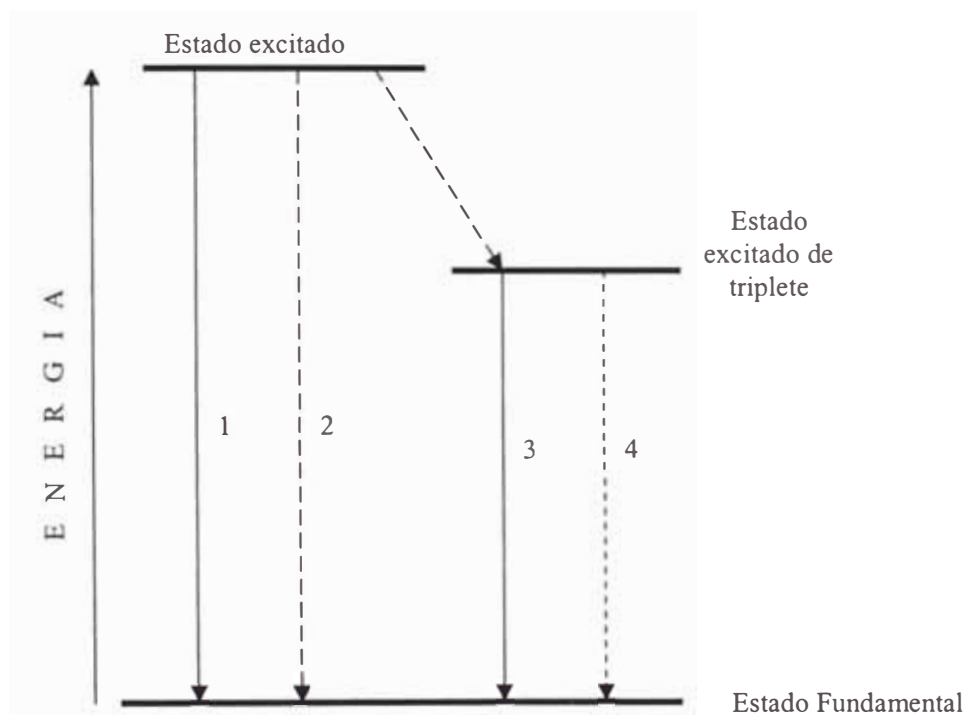


Fig 4.3 Rutas por las cuales las moléculas pueden perder energía de excitación. Las líneas continuas indican emisión de energía radiante; las líneas punteadas representan procesos de desactivación térmica no radiativa.

#### **4.7.- Configuración para Láser de Colorante de Rodamina B (6G).**

Si bien han sido estudiados varios tipos de geometrías de excitación, el sistema de bombeo a emplear aquí es, enfocar el láser UV de  $N_2$  mediante una lente a una de las caras de la celda (cubeta) que contiene el colorante de Rodamina. Como el coeficiente de absorción de éste es grande, el haz de excitación se atenúa rápidamente, de modo que la máxima inversión de población en la celda se alcanza en una zona muy pequeña, a lo largo de la línea focal de la lente. La cavidad normalmente está formada por la combinación de espejos en las paredes de la cubeta o celda. Las variaciones con respecto al sistema de resonadores, así como el uso de diversos tipos de selectores de longitud de onda, permiten obtener anchos de línea con diversos grados de angostamiento y sintonía en toda la banda de ganancia del colorante de rodamina.[3]

## **PARTE EXPERIMENTAL.**

### **4.8.- Elementos utilizados.**

#### **4.8.1.- Láser de bombeo (Excitación de un Láser de Colorante, rodamina 6G).**

La inversión de población en un láser de colorante se consigue mediante bombeo óptico, iluminando con radiación electromagnética de la longitud de onda adecuada. Debido a que cada fotón transporta cierta cantidad de energía, y que hay cierta pérdida de energía (en forma de calor) en el proceso de bombeo óptico. Por ello, la longitud de onda emitida por el láser es mayor que la longitud de onda de bombeo.

Para este trabajo se empleo un láser pulsado de Nitrógeno que emite en 337.1 nm con circuito Blumlein, cuyas características ya fueron especificados.

La excitación de colorantes con este tipo de láseres tiene, además de su construcción simple y económica, ventajas adicionales, en particular, la duración temporal de los pulsos que al ser del orden de los nanosegundos, determina que la población de estados de energía del colorante que no contribuyen al proceso de emisión estimulada (estados triplete) no alcancen valores apreciables. De este modo los colorantes pueden ser bombeados en volúmenes pequeños, contenidos en celdas convencionales del tipo de las utilizadas en espectrofotómetros. Dada que la energía es baja, no es necesario la utilización de circuladores o agitadores del colorante para evitar su degradación por efectos del calentamiento.

#### 4.8.2.- La Óptica.

En esta sección se exponen los detalles para la construcción simple de un láser de colorante, así como la forma de alineación y operación, se hace uso del láser de nitrógeno para bombear al colorante. Se ha elegido para esta parte del trabajo como colorante a la rodamina 6G, con sintonía de emisión que puede ir desde 510 – 600 nm (verde a rojo), teniendo un máximo (emisión láser) en el color amarillo (aproximadamente 560 nm).

La alineación y enfoque es muy sencillo (Fig.- 4.4), se coloca sobre una riel portaobjetos que sostiene la lente y la cubeta que contiene colorante. Se coloca la cubeta el en el foco de la lente (Fig.- 4.5) con desplazamientos alrededor de la distancia de enfoque, para poder buscar posiciones de máximas eficiencias.

#### Montaje del Láser de Colorante.

La celda que contiene al colorante tiene las siguientes características:

Tipo de Cubeta: Cuarzo UV500.

Ancho 7.20 mm

Largo 12.40mm

Altura 44.80mm

Espesor 1.00mm

Lente de Cuarzo de 10 cm de foco.

Tipo de colorante: Rodamina B(6G)

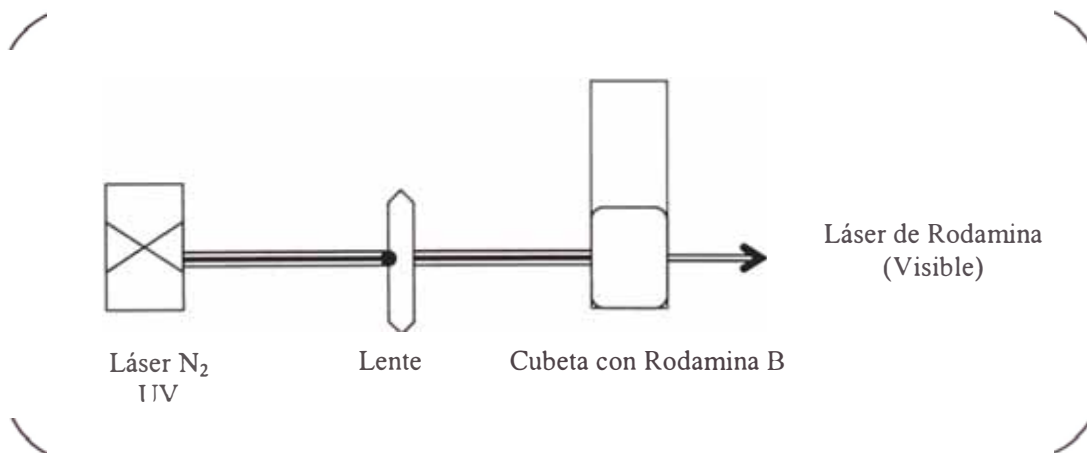


Fig. 4.4 – Láser de colorante rodamina 6G. El colorante es bombeado por el láser UV de nitrógeno.

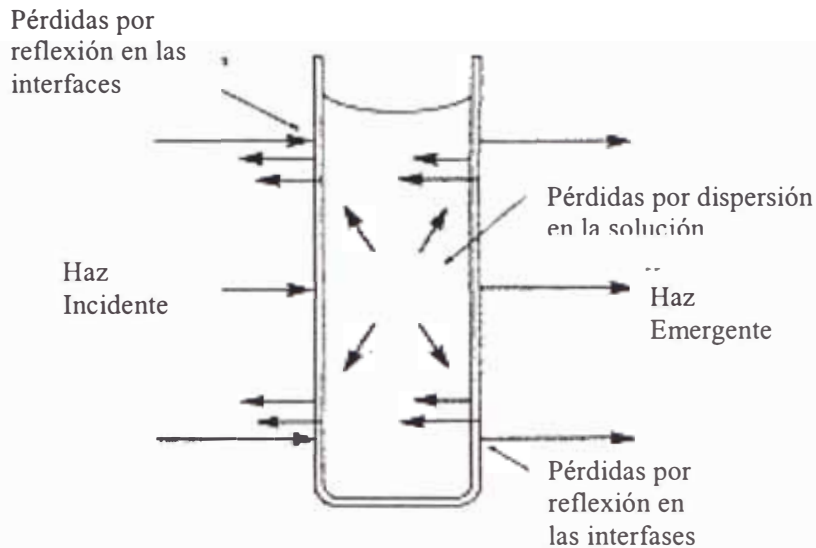


Fig. 4.5 Pérdidas por reflexión y dispersión (cubeta de cuarzo)

Inicialmente la cubeta es colocada en el foco de la lente, donde obtenemos la señal láser muy bien definido (potencia maxima), posteriormente trasladada hacia delante y hacia atrás m y M respectivamente (potencias minimas).

L Ubicación de la Lente.

F Foco de la Lente.

m a M Rango de trabajo para el láser de Rodamina 6G.

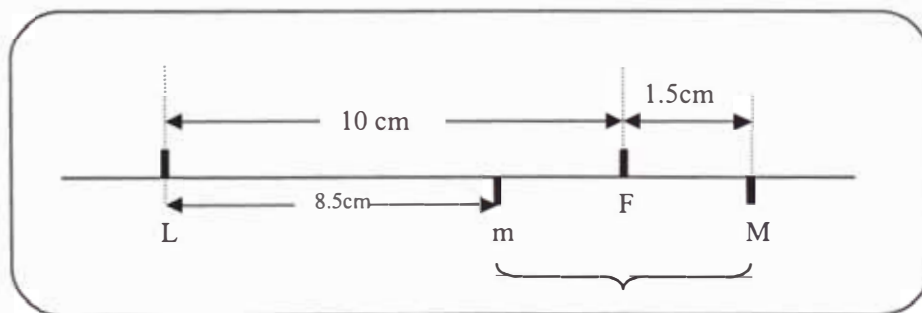


Fig. 4.6 –rango de operación láser de colorante rodamina 6G.

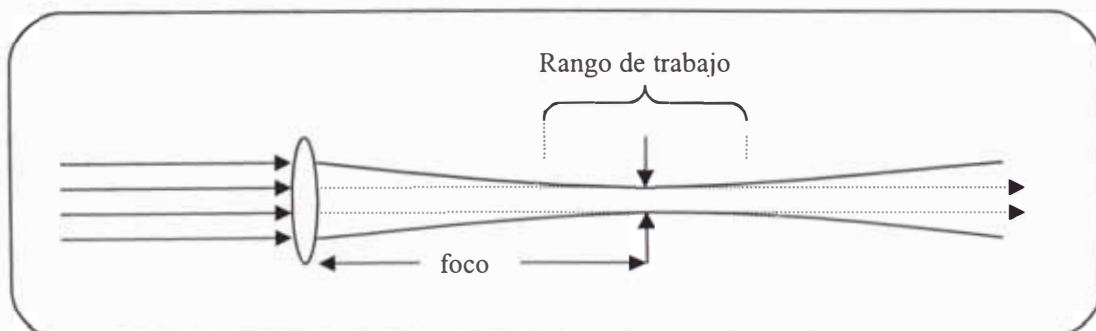


Fig. 4.7 –Forma cualitativa del haz láser cuando este pasa a través de una lente cilíndrica plana.

La tabla muestra algunos colorantes que se pueden utilizar para generar láser de colorantes, bombeados con un láser de Nitrógeno.

Colorante	Pico (nm)	Intervalo (nm)	Eficiencia	solvente	Concent. (g/l)	Absorción. (l/mol <sub>x</sub> cm)10 <sup>-4</sup>
PBBO-365	362	357-390	0.14	DI	1.6	0.7
PBBO	394	385-413	0.37	DI	0.15	4.3
Stilbeno 420	425	405-460	0.7	ME	0.22	1.2
Curamina 460	453	433-486	0.95	ME	0.66	0.6
Curamina 503	504	479-548	1.0	ME	1.6	0.2
Curamina 540 A			0.89	ME	3.1	0.2
Rodamina 590	580	570-615	0.94	ME	1.63	0.5
<b>Rodamina B</b>	<b>620</b>	<b>599-650</b>	<b>0.87</b>	<b>ME</b>	<b>2.1</b>	<b>0.5</b>
DCM	660	628-708	0.7	DMSO	0.5	1.0

DI: dioxano; ME: metanol; DMSO: sulfoxido de dimetilo.[3]

### NITROGEN PUMPED DYES (Laser Photonics)<sup>5</sup>

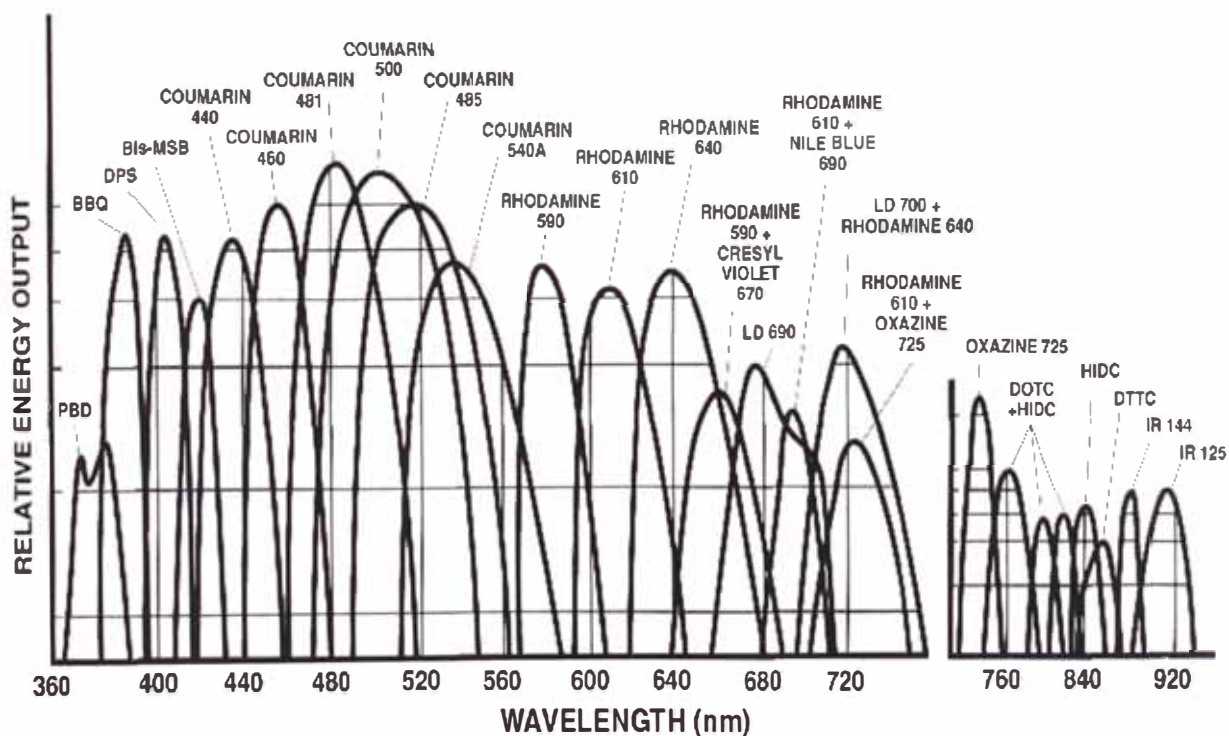


Fig. 4.8 -Espectros de colorantes apropiados para bombeo con láser UV de nitrógeno (EXCITON,INC.)[11]

**Láser sintonizable.**

El elemento básico que se puede emplear como selector de sintonía es una rejilla de difracción de montajes y configuraciones que permite un amplio intervalo de anchos de línea entre 10 nm y  $10^{-4}$  nm, con eficiencias que pueden ir desde un 20% al 2%, respectivamente, para bombeo con láseres de Nitrógeno.

Aspectos tales como calidad del haz, sencillez de alineación y economía de componentes dependen del tipo de configuración elegida. En la figura (4.9) se muestra un esquema de una forma muy elemental de instrumentar una cavidad óptica selectora con un mínimo de elementos, denominada configuración Littrow. Aquí, la salida del haz puede hacerse ya sea por el espejo de acoplamiento o por algún orden de difracción de la misma red de difracción. El sistema se comportará de manera tal que durante el comienzo del pulso de fluorescencia emitida por el colorante, ésta es enviada en todas direcciones. Una pequeña reflexión se reflejará en el espejo de la cavidad y retornará al medio excitado, donde se amplificará y reemitirá en forma de haz intenso y bien colimado.

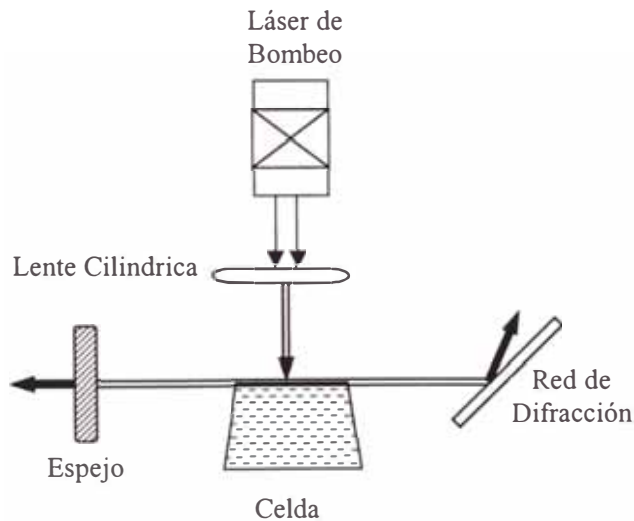


Fig.- 4.9 - Montaje Littrow y sus dos posibles configuraciones de salida



Esta emisión espontánea amplificada incidirá entonces sobre la rejilla, la cual la dispersará de modo que solo una pequeña banda, cuyo ángulo de incidencia coincida con el de difracción, llegará de nuevo a la celda. Esta porción del espectro del colorante es entonces reamplificada, para finalmente emerger por el espejo de salida en la forma de un haz láser de fuerte intensidad y reducido ancho de banda.

Sin embargo, ahora, al colocar la rejilla en forma rasante, la posibilidad de reducir el ancho de banda pasivo del sistema utilizando una mayor zona de la rejilla, no sería del todo práctico si se desea usar un montaje convencional. Sin embargo, se puede lograr el efecto buscado mediante una configuración con red rasante como vemos en la figura 4.10. Veamos, cuando el haz incide sobre la rejilla, el primer orden será difractado en dirección al espejo E2 de reflexión total. Este haz difractado tendrá una alta dispersión angular, de modo que solo un pequeño intervalo de longitudes de onda ( $\lambda$ ) tendrá la dirección perpendicular al espejo y se reinyectará por un camino inverso en la celda. Así la longitud de onda que se reinyecte dependerá de la posición del espejo, que funcionará como selector en longitud de onda ( $\lambda$ ). La salida puede hacerse por el orden cero de la rejilla, o bien por el espejo de acoplamiento E1.

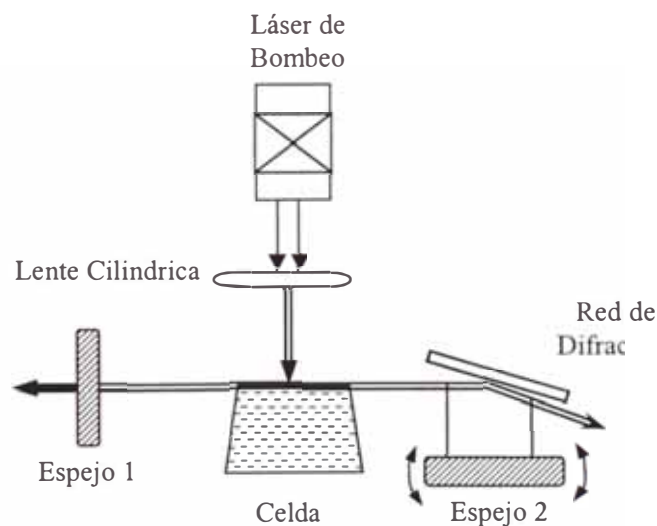


Fig. 4.10 -Montaje con configuraciones rasante

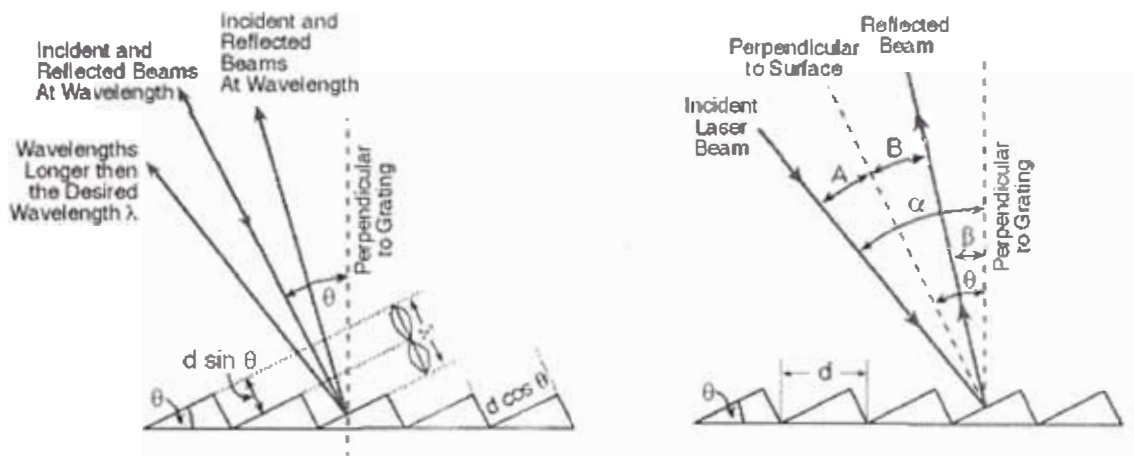


Fig. 4.11 -Reflexión de la rejilla de difracción [20]

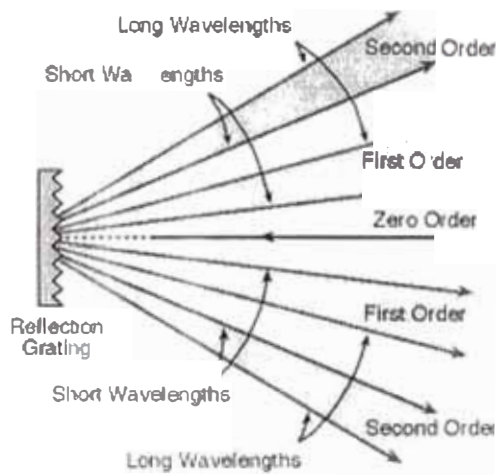


Fig. 4.12 -Orden de reflexión de la rejilla de difracción [20]

#### 4.9.- Características del colorante Rodamina 6G (Rodamina B).

La composición química del colorante Rodamina 6G (B) es muy conocida y a su vez este se disuelve en ethanol. La longitud de onda máxima de absorción es de unos 530 nm y con un rango de absorción del colorante de unos 130 nm. La Longitud de onda máxima de la emisión de fluorescencia es de 560 nm.

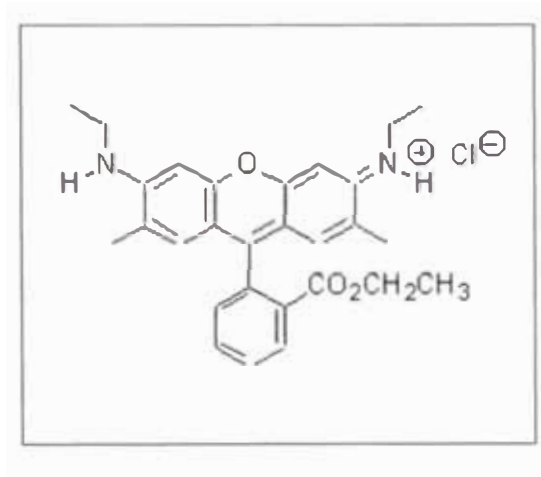


Fig. 4.13 -Estructura orgánica de la Rodamina

El láser de rodamina 6G, emite en el rango visible (color amarillo), la energía y potencia no se midieron.

Absorción:

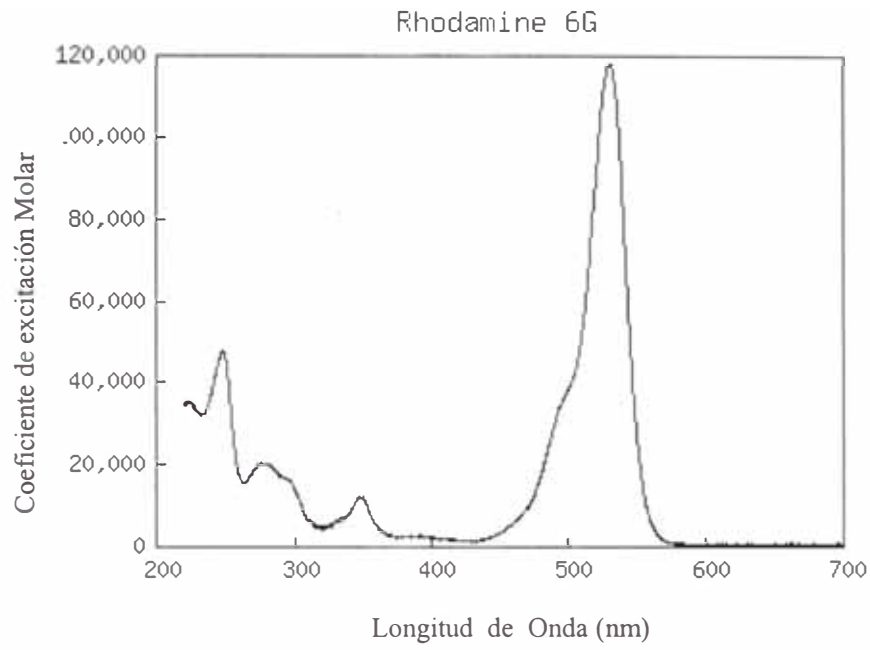


Fig. 4.14 –Espectro de absorcion de la rodamina 6G a temperatura ambiente.[10/20/21]

Fluorescencia:

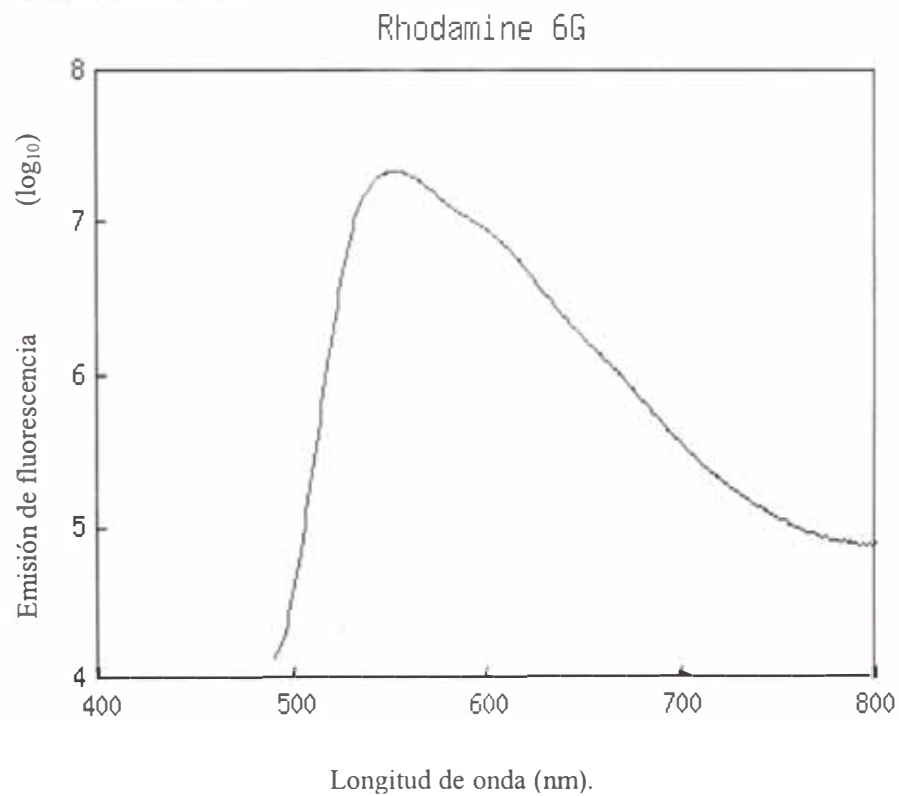


Fig. 4.15 - Espectro de fluorescencia de la rodamina 6G a temperatura ambiente.[10/20/21]

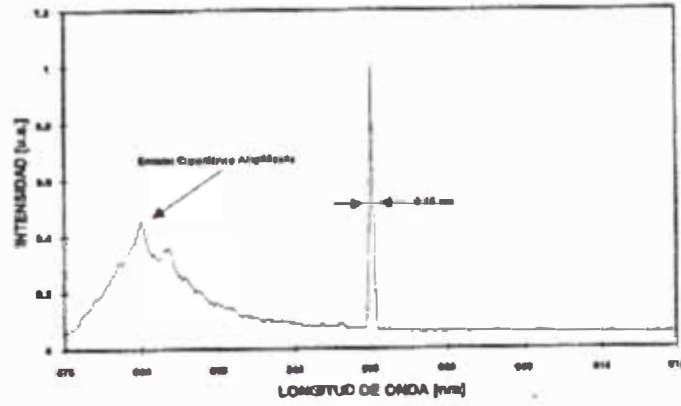


Fig. 4.16 -Espectro de emisión de la Rodamina 590 (Montaje Littrow) sintonizado en 595 nm, bombeada en 337.1 nm con 220  $\mu$ J. [3]

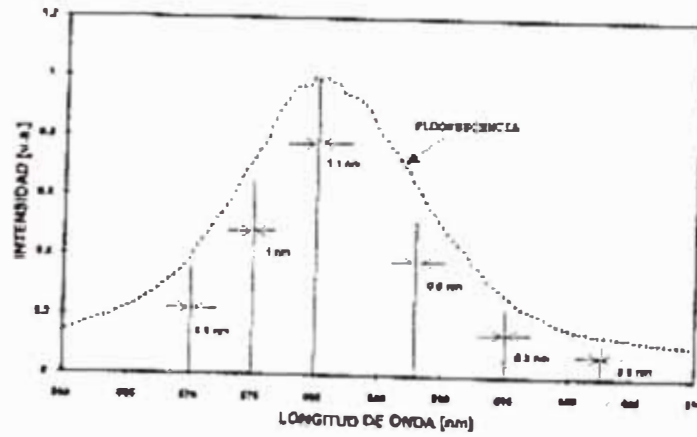


Fig. 4.17 -Fluorescencia y anchos de línea para la Rodamina 590 (Montaje Littrow) para varias longitudes de onda, bombeada en 337.1 nm con 220  $\mu$ J. [3]

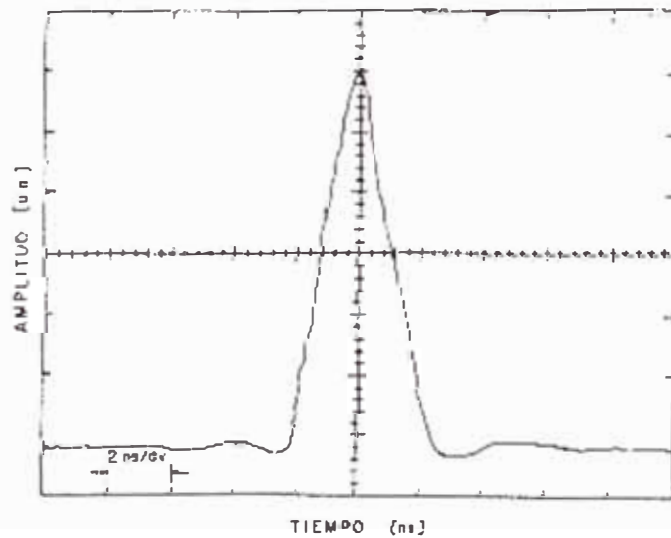


Fig. 4.18 -Pulso láser de Curamina 503 (24 $\mu$ J), bombeado en 337.1 nm con 220  $\mu$ J. Emitiendo en 504 nm en configuración de red rasante, con un ancho de banda de 0.004 nm.[3]

#### **4.10.-Ventajas del Láser de Colorante:**

- Un líquido es homogéneo por naturaleza, y no tiene las dificultades de manufacturación de un sólido homogéneo perfecto, sin defectos.
- Es relativamente fácil de cambiar el tipo de líquido utilizado como medio activo. Por lo tanto, puede cambiarse el rango de longitud de onda de la radiación emitida.
- El líquido absorbe el calor producido durante el proceso láser, por lo que el enfriamiento del láser es simple. El medio activo es sustituido continuamente.
- Las propiedades especiales de la radiación de salida de un láser de colorante son:
  - Anchura de línea muy estrecha.
  - Pulsos muy cortos

#### **4.11.-Inconvenientes del láser de Colorante :**

- La mayor parte de los láseres de colorante utilizan un líquido como medio activo, lo que complica el mantenimiento del láser.
- La excitación se realiza por medio de otro láser, lo que complica el sistema.
- Corto tiempo de vida del colorante. El colorante se degrada con el tiempo, y debe ser sustituido.
- La operación continua es cara.
- Los colorantes son potencialmente tóxicos (venenosos) .
- Los colorantes son disolventes volátiles.

En los últimos años, se están desarrollando láseres de colorante de estado Sólido.

Las desventajas del líquido se eliminan incluyendo las moléculas del colorante en un material sólido.

## **Conclusión:**

Se ha instrumentado láseres UV de nitrógeno gaseoso tipo Blumlein a presiones atmosféricas y que no excede una tensión de carga de 17kV, cuyas características se dan en el capítulo 3, que por supuesto los resultados obtenidos son satisfactorios, si los comparamos con láseres comerciales de las mismas características.

Por tener una armadura (contenedor) de geometría plana permite su fácil transporte y pueden ser usados por estudiantes de nivel medio (secundaria) y superior para fines didácticos o de investigación. Se ha trabajado en dos módulos, primer módulo con electrodos de 50 cm y el segundo módulo con electrodos de 150 cm de longitud, donde el segundo módulo, su optimización (medir su potencia y energía) se deja para posteriores trabajos.

En este modelo de láser construido, las características de los pulsos láseres, los hacen útiles para diferentes aplicaciones. Es precisamente que se ha utilizado para bombear un colorante (rodamina 6G) para generar un láser de colorante en el rango visible del espectro electromagnético.

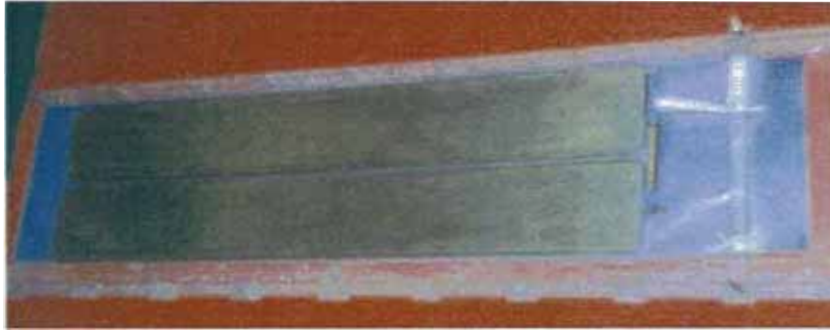
Este láser de colorante es muy sencillo de instrumentar con un mínimo de componentes (capítulo 4, parte experimental). Mas aun si se contase con otros instrumentos, por ejemplo un monocromador y un detector sensible, seria muy sencillo realizar mediciones de ganancia, para este colorante y otros diversos o mezclas de ellos en distintos solventes y concentraciones, con el fin de extender el intervalo de sintonía.

Si bien los resultados obtenidos en este trabajo son satisfactorios, se deja aun mucho por experimentar con estos módulos en diferentes áreas de la física experimental, donde es posible hacer mejoras en su diseño.

**Anexo D:**

**Fotos del sistema láser construido:**

Foto 1:



Presentación final, latón, electrodos y accesorios listos para poner en funcionamiento (pruebas de laceo en aire)

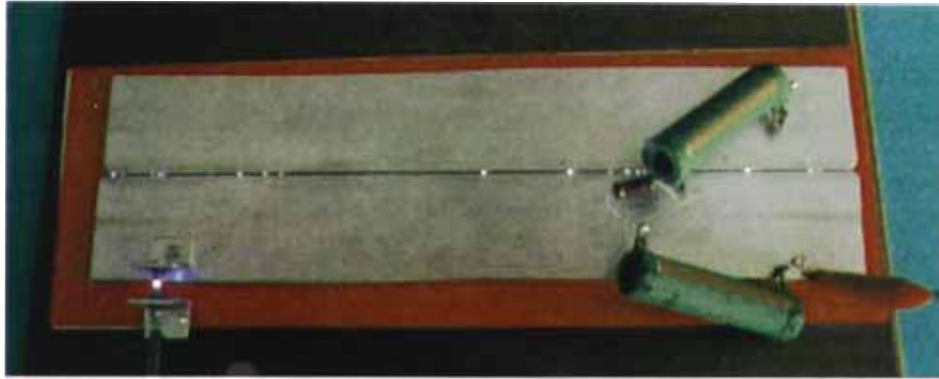
Foto 2:



Presentación final del proyecto. Láser superradiante de nitrógeno (geometría plana)

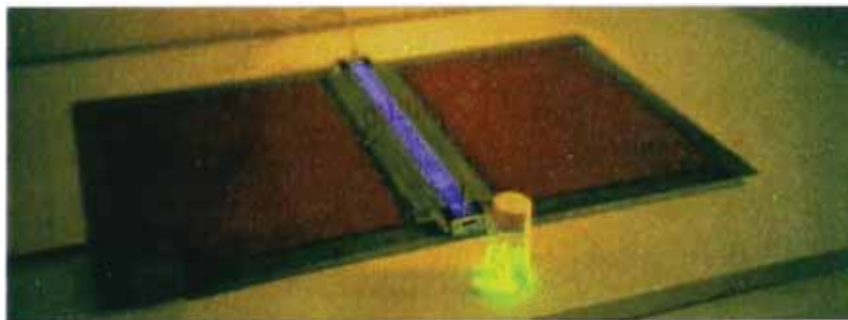


Foto 3:



Instantes en que se produce la descarga eléctrica, entre el chispero y los electrodos. Prueba hecha al aire libre. ( Cortesía del laboratorio de óptica. Univ. Autónoma de México, vía e-mail Junio – 2001)

Foto 4:



Instantes en que se produce láser UV, que incide en un colorante (cortesía del laboratorio de óptica. Univ. Autónoma de México, vía e-mail Junio – 2001)

## Referencias:

- [1] Dr. Bertram Hanssum., Espectroscopia Láser., Separata de clases (FC-UNI) (1994)
- [2] Handbook of Chemistry and Physics, 67Ed. CRC Pres, Inc. (1987)
- [3] M. Villaran M. Rev. Mex. Fis. 40 (6) (1994) y 41 (1995).
- [4] C.S. Willet, Introduction to Gas Lasers, Pergamon Pres, NY (1974) P342.
- [5] C.S. Willet, T. J Gleason. App. Phys. Lett 21 (1972) P276.
- [6] G. J Schultz Phys. Rev 116 (1959) P1141.
- [7] H. G. M Heideman J. Chem. Phys. 44 (1966) P355.
- [8] D.T. Stewart, E. Gabathuler, R.W Nicholls., M.E. Pillow. Proc. Phys Soc. (1958), 287
- [9] J.P. Girardeau – Montaut Nov. Rev. Optique 5-6 (1974)
- [10] M. Fernandez Gausti. Rev. Mex. Fis. 36 (1990), 38 (1992).
- [11] Exiton Inc. Laser Dye Catalog. (1992).
- [12] James S. Frtz, George H. Sk. Química Analítica Cualitativa 3Ed. Limusa-Mexico (1974) P505.
- [13] Skoog/West/Holler Química Analítica 6Ed. McGraw-Hill.(1990)
- [14] P.W. Atkins. Molecular Quantum Mechanics. 2Ed. Oxford New York.(1975)
- [15] I.P.Zapesochnyi , Opt. Spectry, (1976) 21
- [16] Alain Petit. Laser UV a onde Progressive. A L'UNIVERSITE DE PARIS-SUD.(1976)
- [17] Alain Petit. P. Goujon y M. Clerc Laser UV a onde Progressive. JUILLET / AOUT (1975) 204
- [18] Amnon Yariv. Quantum Electronics 2<sup>da</sup> ed. John Wiley & Sons. Inc. (1975).
- [19] B. A. Lengyel. Lasers. John Wiley – Interscience. NY (1981).
- [20] A. Requena, C.Cruz, A. Bastida y J. Zúñiga. "The Laser Adventure" . Universidad de Murcia. España. (1998)
- [21] Banwell, C.N. and McCash, Elaine M.: "Fundamentals of Molecular Spectroscopy", McGraw-Hill, London (1994), 4th ed.
- [22] Bertran, Joan. y Núñez Delgado, Javier.: "Química Física ", Ariel Barcelona (2002).