



Universidad
Carlos III de Madrid
www.uc3m.es

TEMA 5:

RESONADORES OPTICOS Y MODOS LONGITUDINALES EN CAVIDADES LASER. DIFERENTES TIPOS DE LASERES

FOTONICA

Grado en Ingeniería en Tecnologías de
Telecomunicación

1.-RESONADORES OPTICOS Y MODOS LONGITUDINALES EN UNA CAVIDAD LASER

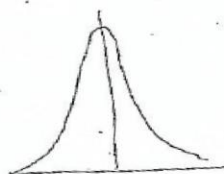
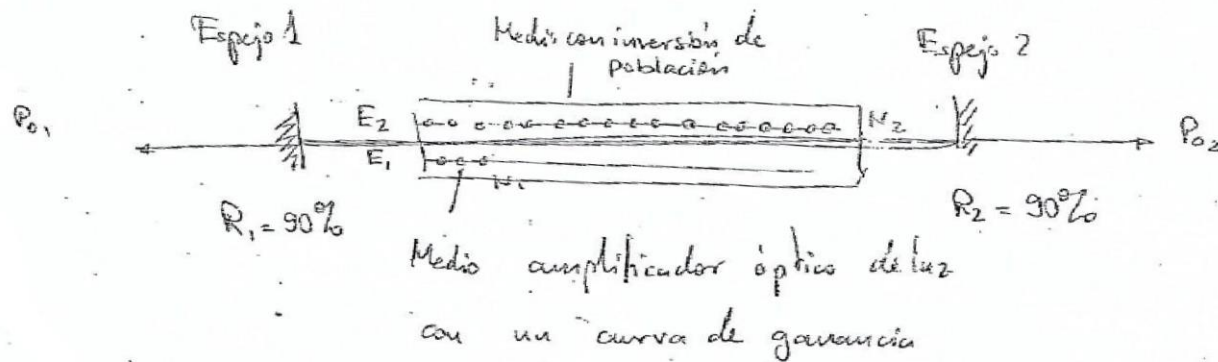
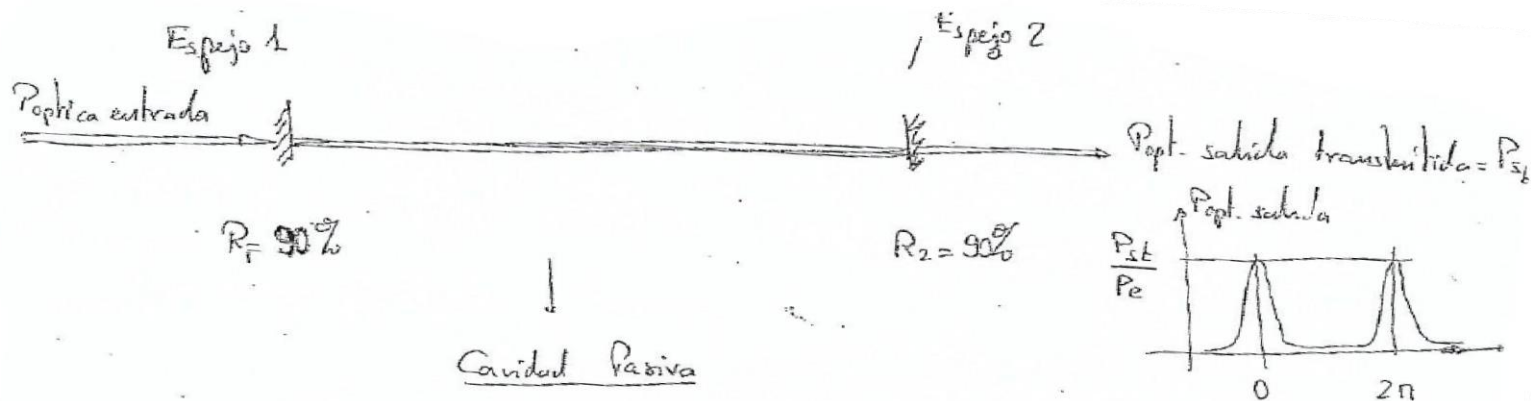
2.-DIFERENTES TIPOS DE LASERES

2.1.-LASERES DE ESTADO SOLIDO.

2.2.-LASERES DE GAS

2.3.-LASERES DE SEMICONDUCTOR

1.-Resonador Optico Fabry-Perot y Modos Longitudinales en una Cavity Láser.

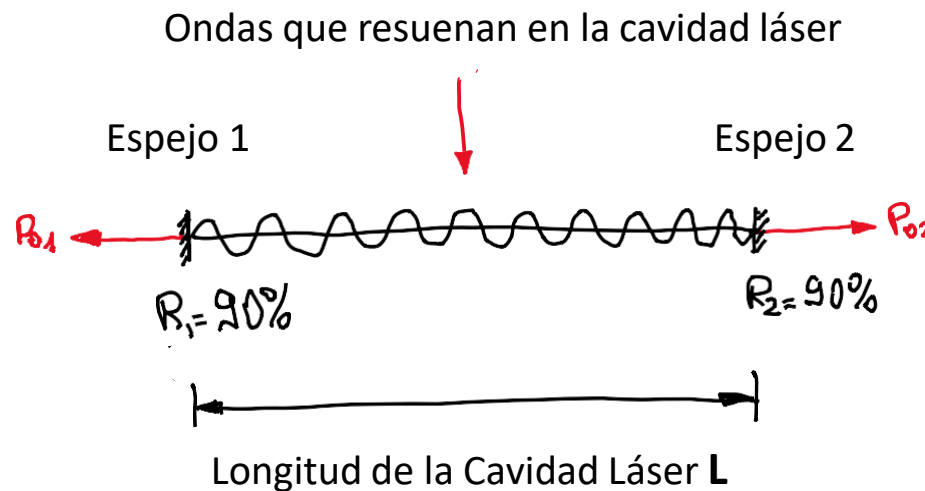


$$f_0 = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

1.1.-Concepto de Resonador en Cavidades Láser Fabry-Perot

La luz en el interior de la cavidad Láser Fabry-Perot resuena ya que está asociada a la frecuencia óptica **f_0** .

Esto implica que tiene asociada una longitud de onda **λ_0** . Es decir: **$c = \lambda_0 \times f_0$** .



Esta situación es similar a las Cavidades Resonantes Acústicas utilizados en varios instrumentos de cuerda como es una Guitarra

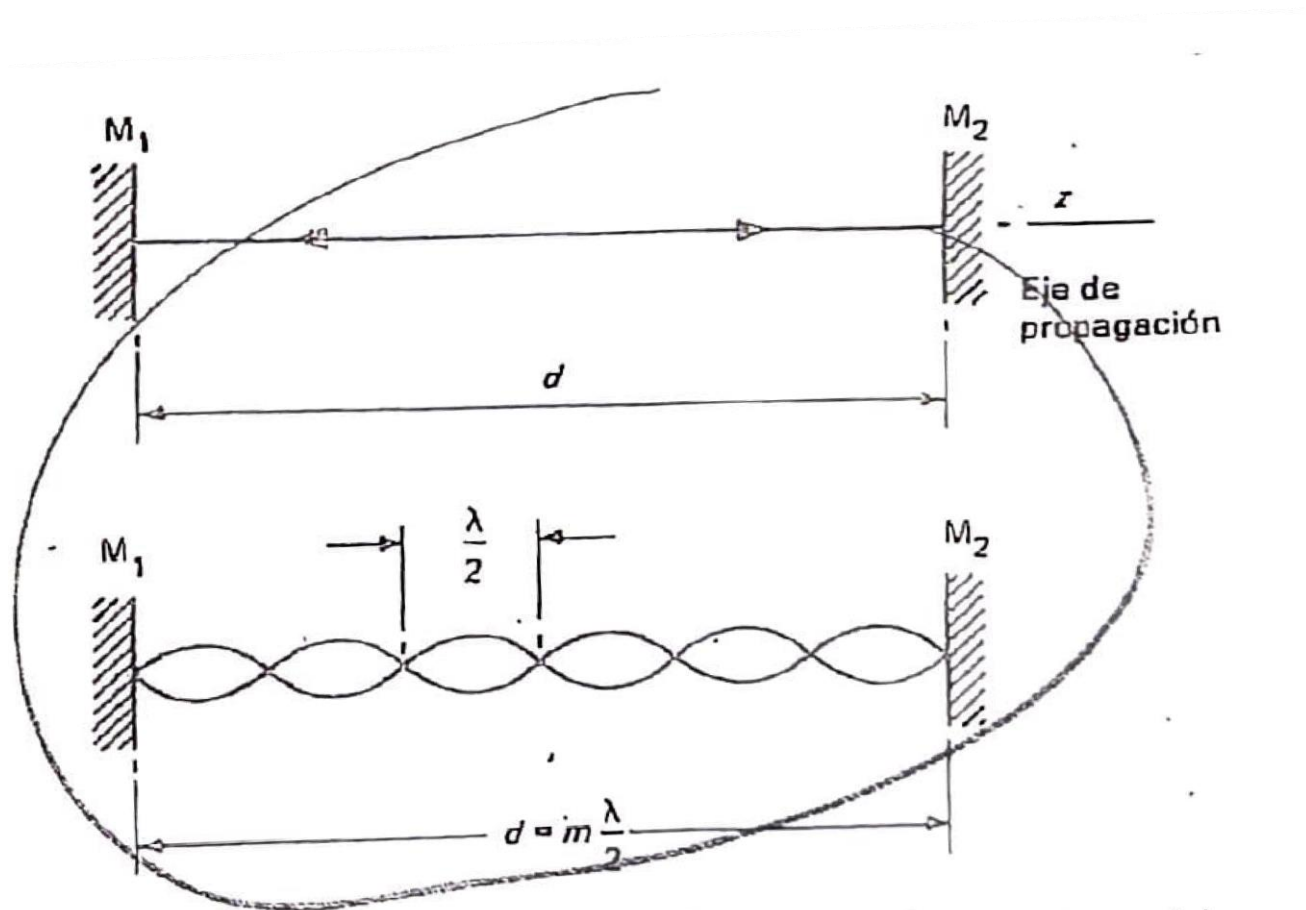
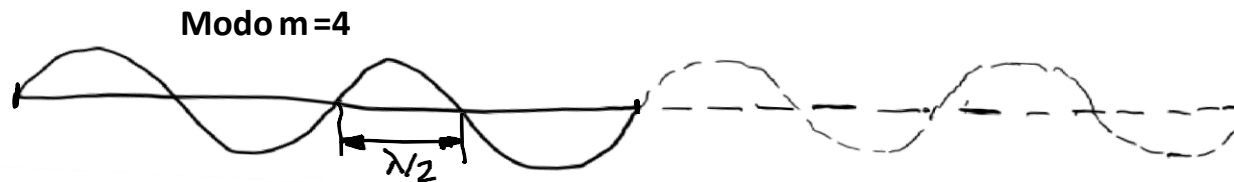
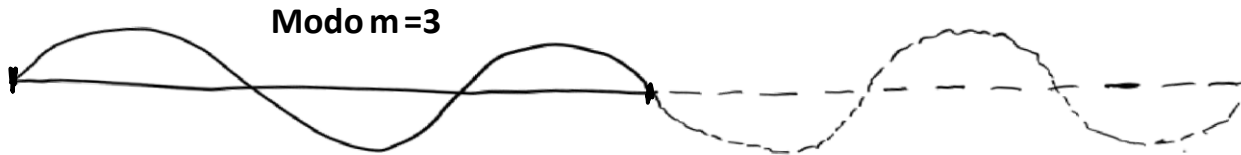
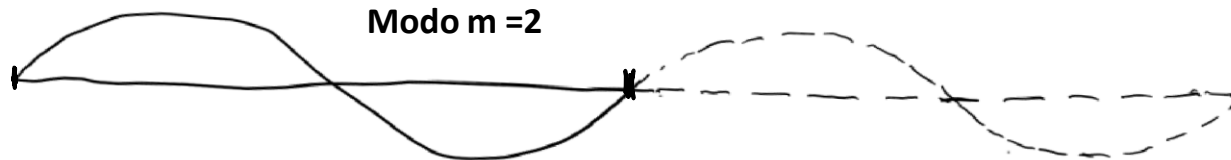
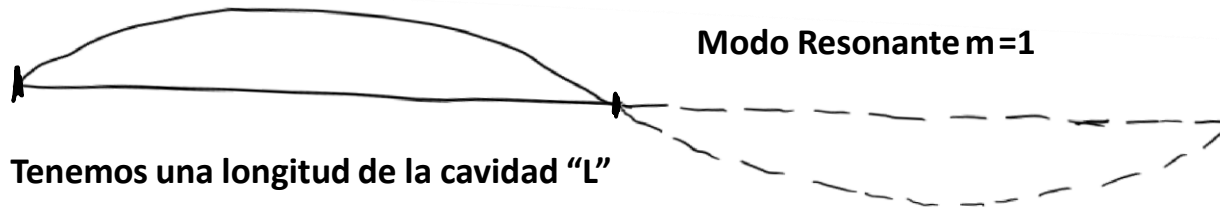


Figura 9.6 Los espejos están situados a ambos extremos del medio de láser. La presencia de espejos favorece las longitudes de onda para las cuales $m\lambda$ completa prácticamente la distancia entre los espejos.

1.2.-Modos Longitudinales en una Cavity Láser



Siempre tenemos un número entero de semiperiodos que resuenan en la Cavity Láser

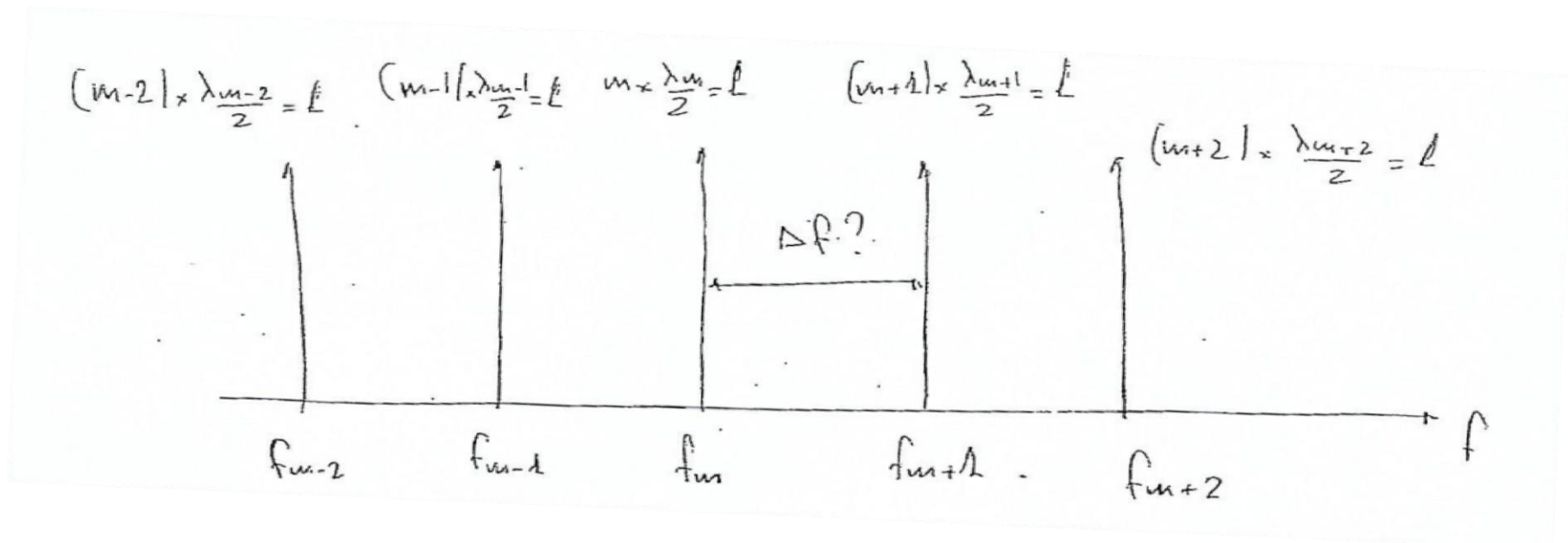


Siendo " L " = $m \lambda/2$

En consecuencia, tenemos un número entero de semiperiodos en la Cavity Láser siempre que se cumpla la condición " $L = m \lambda/2$ ".

En una cavity Láser pueden resonar más de un modo siempre que se cumple la condición " $L = m \lambda/2$ ".

A los modos que puedan resonar dentro de la Cavity Láser que cumplan la condición " $L = m \lambda/2$ " le corresponde un espectro en frecuencia:



Siendo m el Modo " m "

Vamos a ver la equivalencia en Frecuencia.

$$\left. \begin{array}{l} m \times \lambda/2 = L \\ (m+1) \times \lambda_{m+1}/2 = L \end{array} \right\} \quad \begin{array}{l} \text{Asimismo sabemos que: } \lambda_m = c/f_m \text{ y} \\ \lambda_{m+1} = c/f_{m+1} \end{array}$$

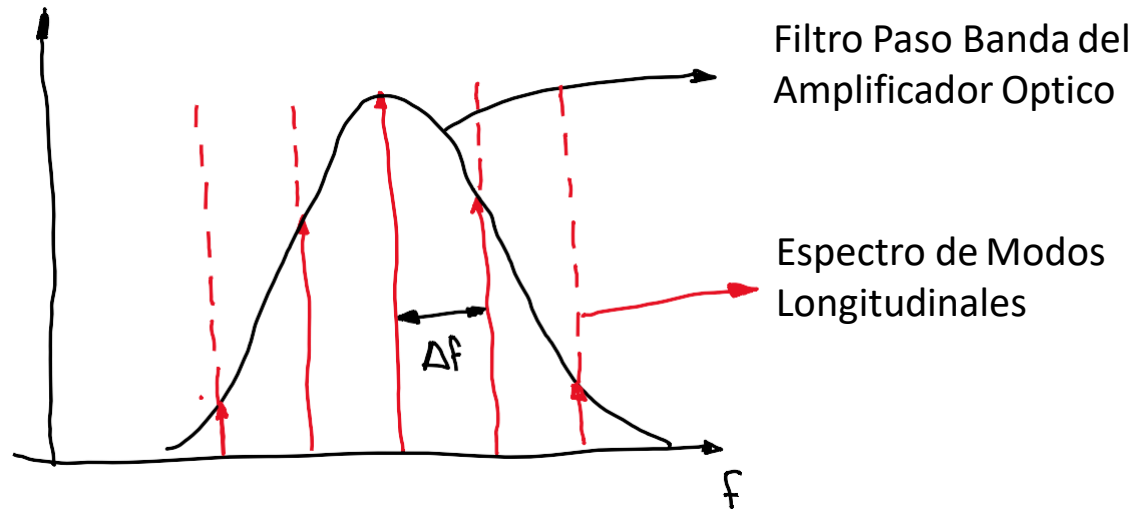
En consecuencia, tenemos que: $2L/m = \lambda_m = c/f_m$

y que: $2L/(m+1) = \lambda_{m+1} = c/f_{m+1}$

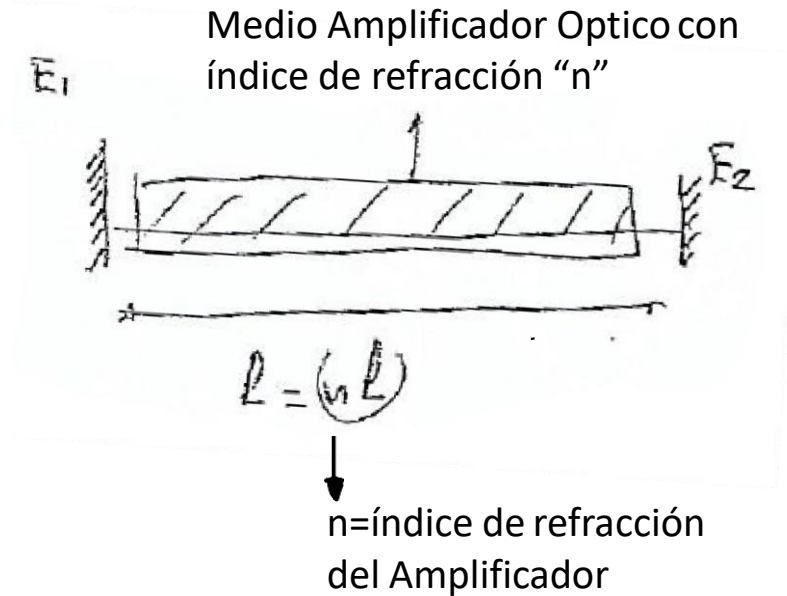
$$\left. \begin{array}{l} f_m = c/2L \times m \\ f_{m+1} = c/2L \times (m+1) \end{array} \right\} \quad \begin{array}{l} \Delta f = f_{m+1} - f_m = c/2L \times (m+1) - c/2L \times m = \\ = c/2L \times m + c/2L - c/2L \times m = c/2L \end{array}$$

Por tanto: $\Delta f = c/2L$.

Esto nos indica que la separación en frecuencia de los modos longitudinales o de las frecuencias estacionarias que resuenan en el interior de la Cavidad Láser es constante



En un Láser a diferencia de un Oscilador Electrónico tenemos un Espectro Multifrecuencia ya que tenemos una cavidad resonante necesaria para crear el Efecto Láser



Por tanto tenemos: $\Delta f = c/2nL$

Siendo **c/n** la velocidad
de propagación de la Luz
en el Amplificador Optico

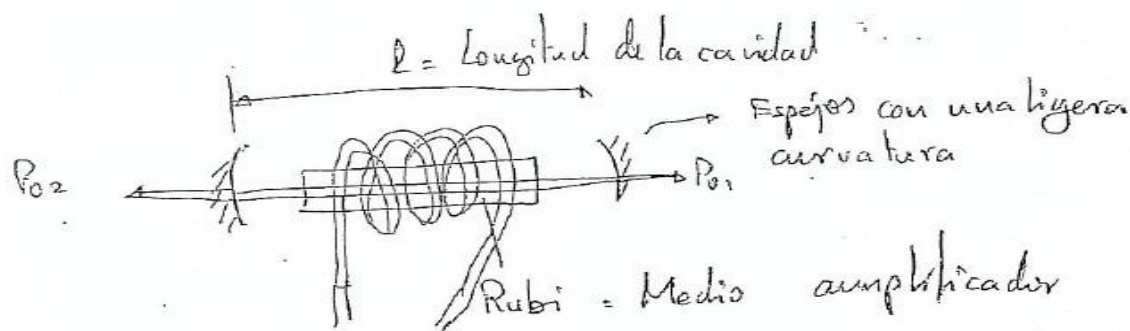
Esta expresión: $\Delta f = c/2nL$ se corresponde con las Expresión
10.4 en la página 225 y 226 del libro "Optics" de Hecht and Zajac

2.-DIFERENTES TIPOS DE LASERES

2.1.-LASERES DE ESTADO SOLIDO.

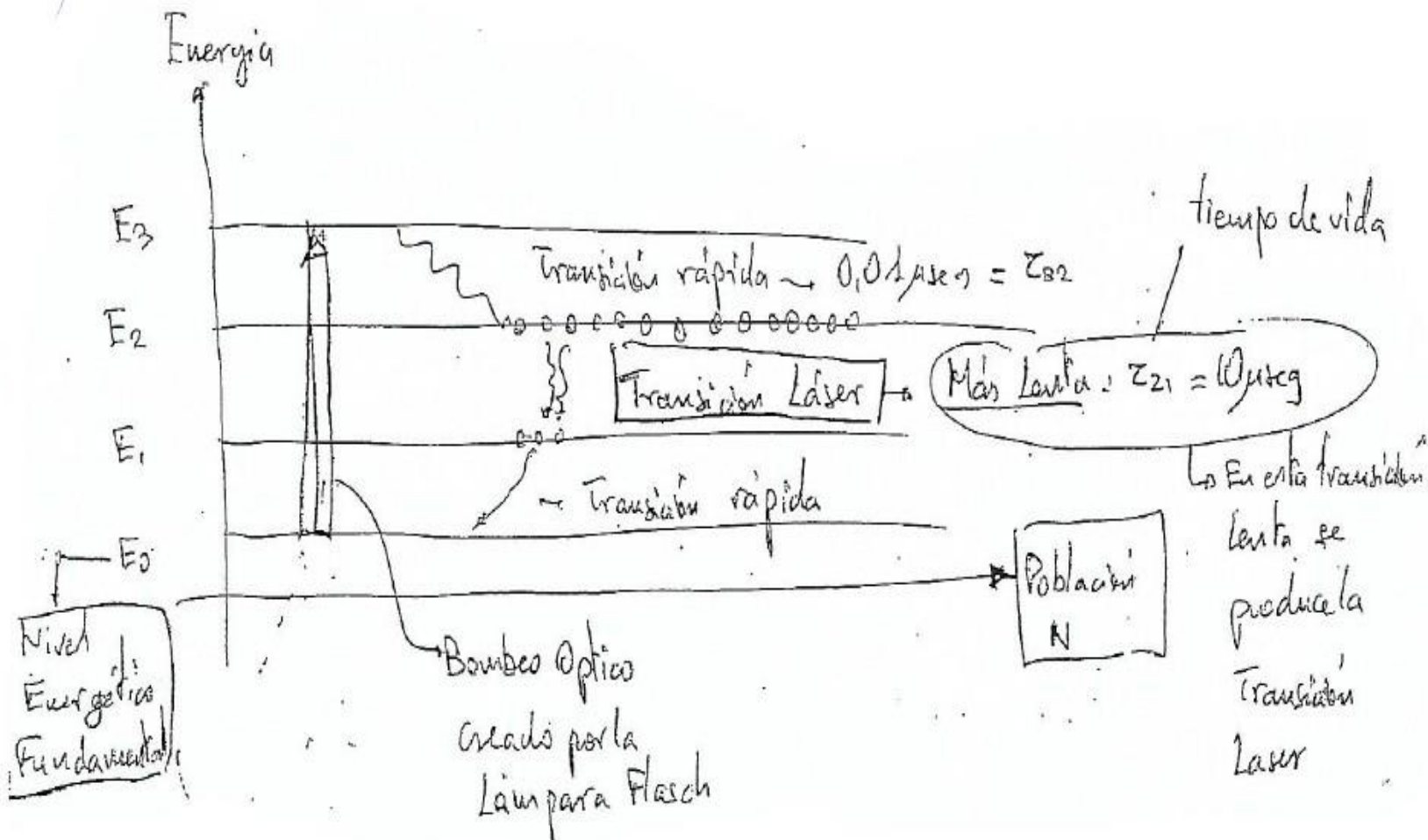
¿Cómo se consigue la inversión de población: Por Bombeo Óptico

1^{er} Láser descubierto en 1960: LÁSER de RUBI descubierto por MAMMAN

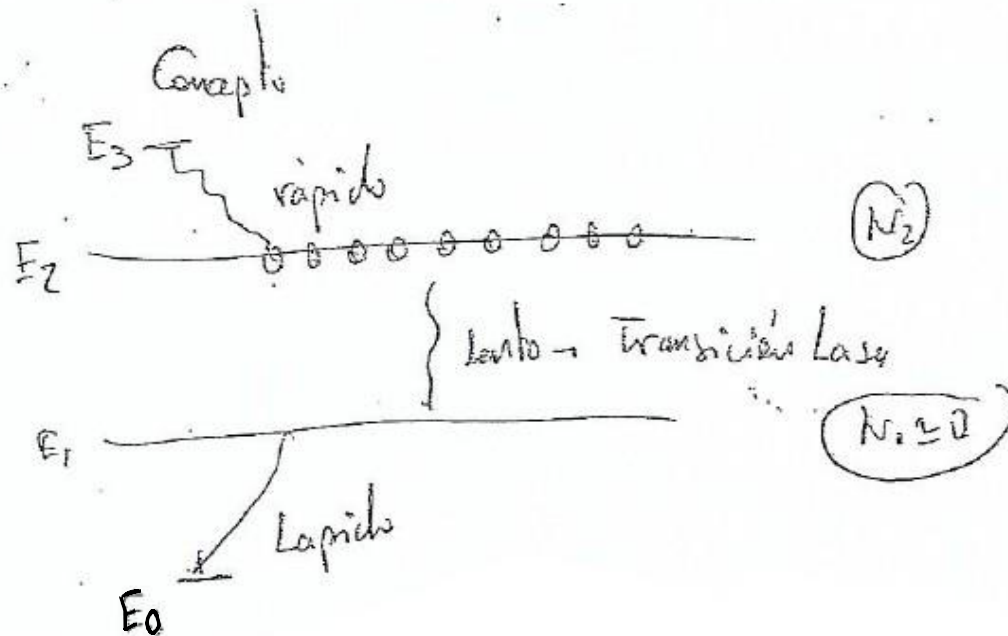


Lámpara Flash
similar a las utilizadas
en Fotografía

El medio amplificador
de Rubi tiene 4
Niveles energéticos



La Idea fundamental es crear una
distribución de población en donde $N_2 - N_1 \approx N_2$
de forma que $N_1 \approx 0$



El láser de *rubí* (figura 9.17) es sin duda el más antiguo de los existentes. Existió antes de haber recibido su nombre, cuando T. Maiman construyó en 1960, dispositivos de este tipo a los que llamó *másers* (Microwave Amplification by Stimulated Emmission of Radiation, amplificación de microondas por emisión estimulada de radiación). Maiman amplió los procesos atómicos de máser desde la radio de microondas hasta las frecuencias ópticas. El rubí es un material rojo rosado transparente; zafiro sintético (Al_2O_3) contaminado con óxido de cromo (Cr_2O_3). El bombeo del láser es óptico, por medio de un tubo incandescente que envuelve la varilla de rubí. Tempranamente, en 1965, se consiguieron potencias máximas del orden de megavatios (ver tabla 9.1). El láser de rubí emite a una $\lambda = 694$ nm.

Se pueden obtener niveles de potencia similares con otros materiales sólidos bombeados ópticamente: *vidrio contaminado con neodimio* (vidrio Nd). El interés principal del vidrio radica en el hecho de que se pueden fabricar a partir de él

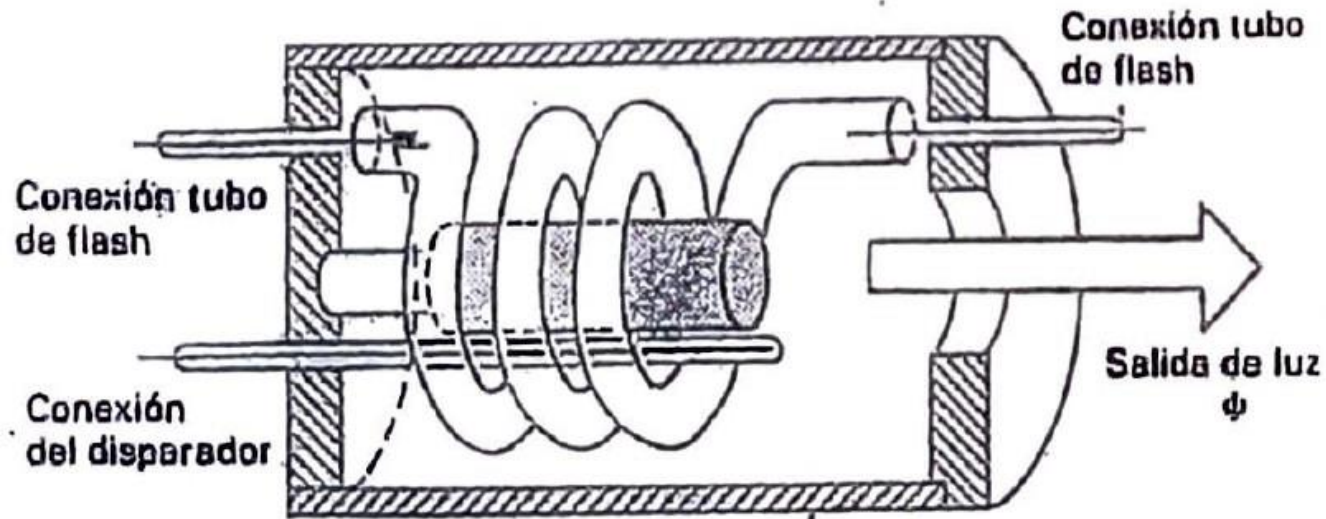
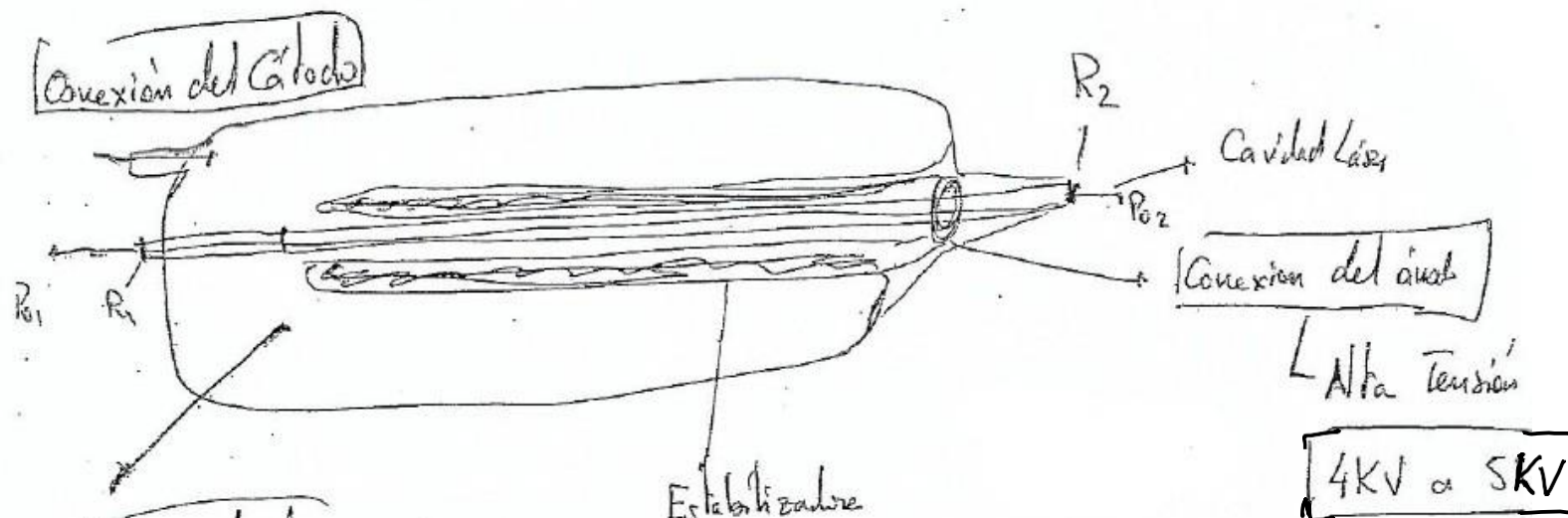


Figura 9.17 En el láser de Maiman un tubo de flash se enrolla a una varilla de rubí de un diámetro usual de 1-1.5 cm.

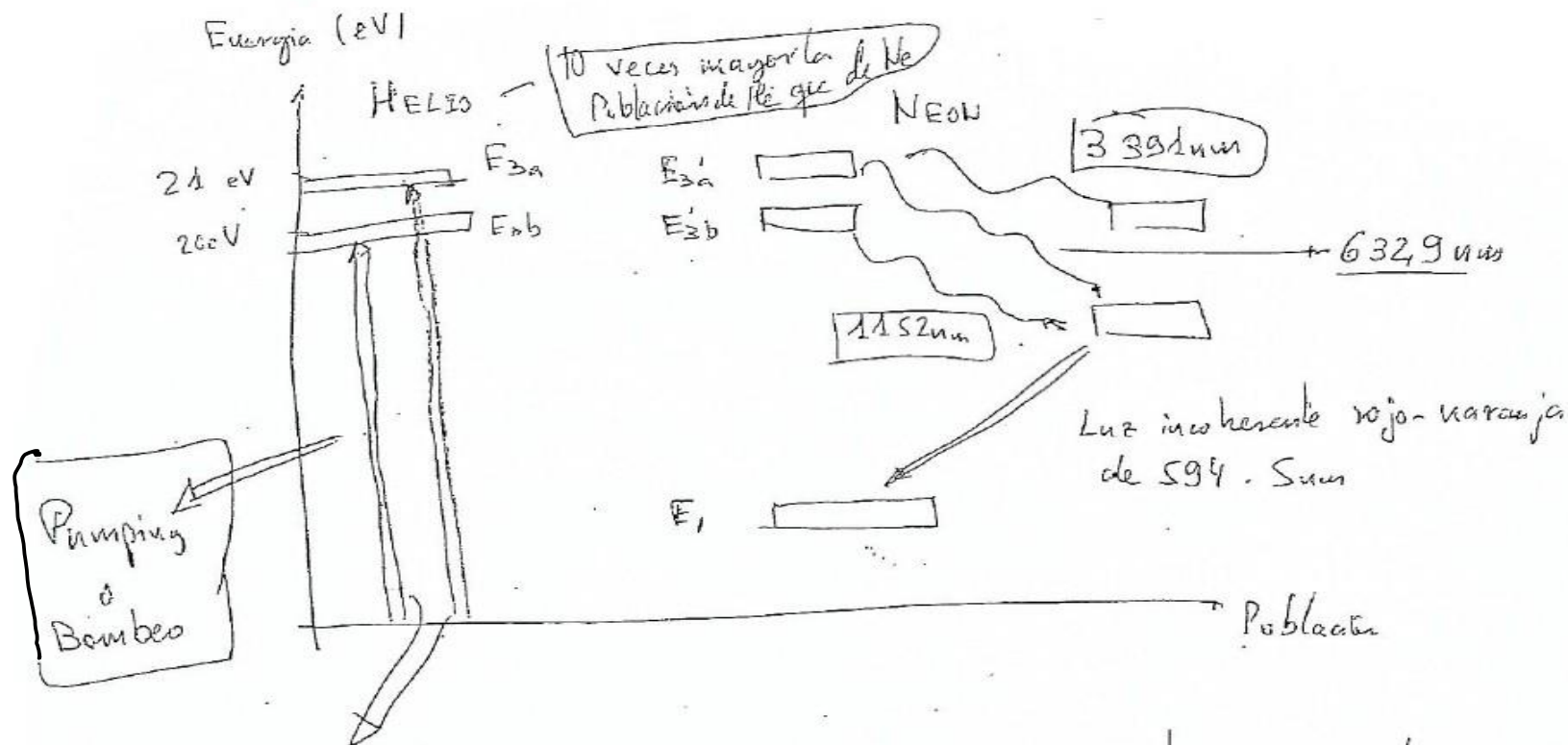
2.2.-LASERES DE GAS: Láseres de He-Ne



Con ayuda se
ioniza el He

los átomos de He ionizados alcanzan mucha velocidad
le pasan la energía a los átomos de Ne

La Población de He $\approx 10 \times$ Población de Ne



Excitación de energía
por ionización de los
átomos de Helio

Tiene 3 transiciones láser
posibles, siendo la más común
y conocida del color rojo
con $\lambda = 632.9 \text{ nm}$

El láser de helio-neón (HeNe) es el más usado. Barato, fiable y fácil de utilizar, este láser suele tomar la forma de un armazón tubular de entre 30 y 50 mm, de unos 300 a 500 mm de longitud y unido por cable a una unidad de suministro de energía del tamaño de un pequeño diccionario de bolsillo. La gama de modelos existentes libera desde 0.5 a 50 mW de agradables haces rojos brillantes.

El funcionamiento de un láser de HeNe (figuras 9.8 y 9.9) se basa en una transmisión de energía de gas a gas: el helio actúa como elemento de bombeo y el

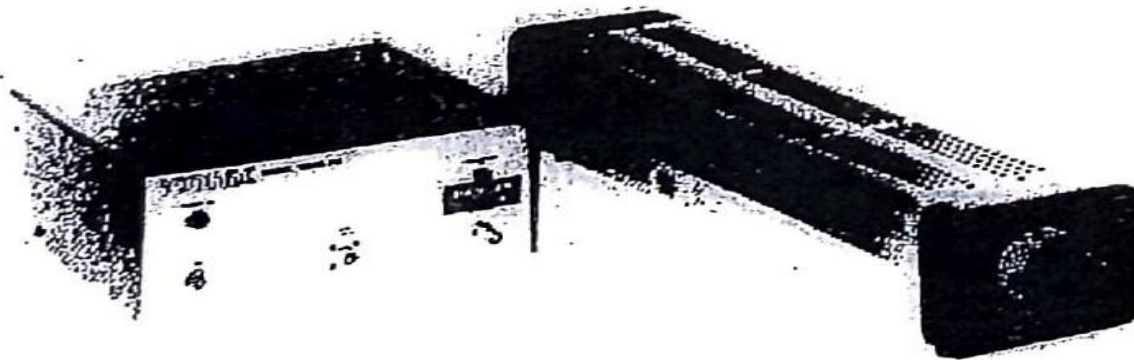


Figura 9.9 Uno de los modelos estacionarios que puede generar el láser.

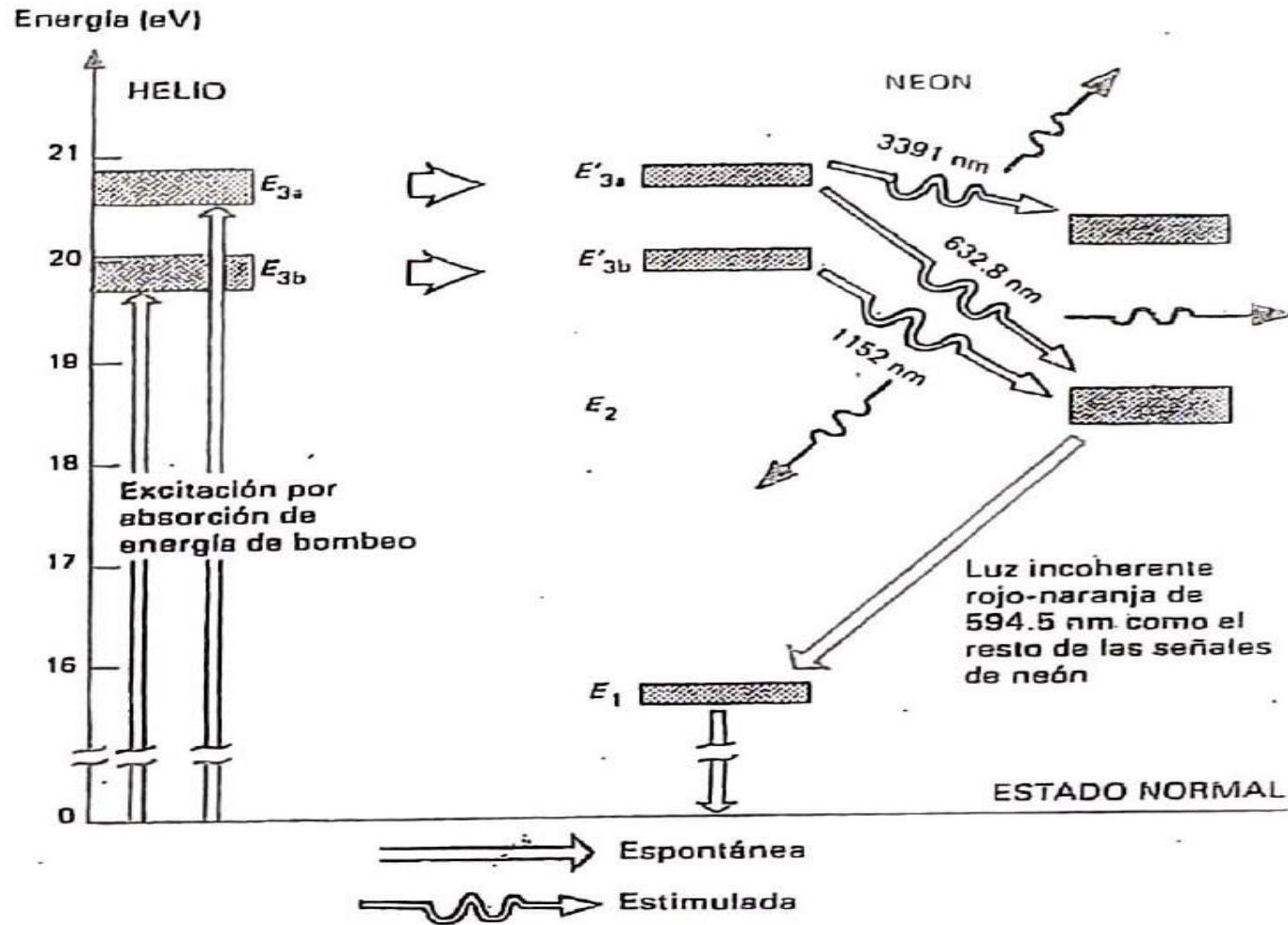


Figura 9.10 El funcionamiento de un láser de HeNe se basa en una transmisión de energía en tres niveles. El helio realiza la función de bombeo y el neon la de láser.

neon hace las funciones del láser. De tipo energético, implica un proceso de tres niveles (figura 9.10). La mezcla gaseosa se ioniza por la aplicación de unos 2 kV de c.c. (10 kV en el arranque) a los dos electrodos extremos del láser. Aunque los dos gases quedan ionizados, con muchos electrones en ambos tipos de átomos ahora en el nivel E_3 , puede producirse una transición descendente *radiativa* únicamente en el neon. Efectivamente, determinadas reglas de la mecánica cuántica (principio de exclusión de Pauli, ver por ejemplo Ref. 29, p. 9 o Ref 280, pp. 515 y 548) prohíben dichas transiciones en el helio. El estado de un átomo de helio con un electrón E_3 se considera *metaestable*, es decir, de larga duración. El resultado es una mayor probabilidad de encontrar muchos de ellos en un instante determinado de tiempo. Ello, sumado al hecho de que la mezcla contiene diez veces más átomos de helio que de neon, hace bastante probable la colisión entre átomos de helio agitados en el estado anterior y átomos de neon en estado normal. Estas colisiones son las responsables de la transmisión de energía de gas a gas. Denomina-

das *inelásticas*, convierten a los átomos de helio en auténticos perdedores y a los átomos de neon en grandes beneficiados: los primeros vuelven a caer al estado E_1 , y los segundos alcanzan al estado E_3 . Observamos claramente que los choques originan una inversión de la población en el neon, una de las tres condiciones necesarias para producir los láseres. Las dos condiciones restantes, la estimulación fotónica y la realimentación óptica positiva selectiva, se consiguen de la forma que se expone a continuación. Las transiciones electrónicas radiactivas descendentes $E_3 \rightarrow E_2$ permitidas en el neon producen emisiones espontáneas cuyos fotones pueden disparar una emisión estimulada y en avalancha, cuando los espejos situados a ambos extremos del láser distanciados $d = m\lambda/2$ garantizan una realimentación selectiva. La figura 9.11 muestra la sección transversal de un láser de HeNe fabricado comercialmente. Antes de terminar, debemos poner de relieve que la estructura de la línea de emisión de la mezcla helio-neon es más compleja que la descripción anteriormente citada, con más de una transición radiativa permitida en el neon y cuatro longitudes de onda principales de láser, tres de las cuales corresponden al infrarrojo. Sin embargo, la que se utiliza con preferencia es la inmensamente popular radiación visible roja brillante de $\lambda = 632.8$ resultante del proceso que se acaba de describir.

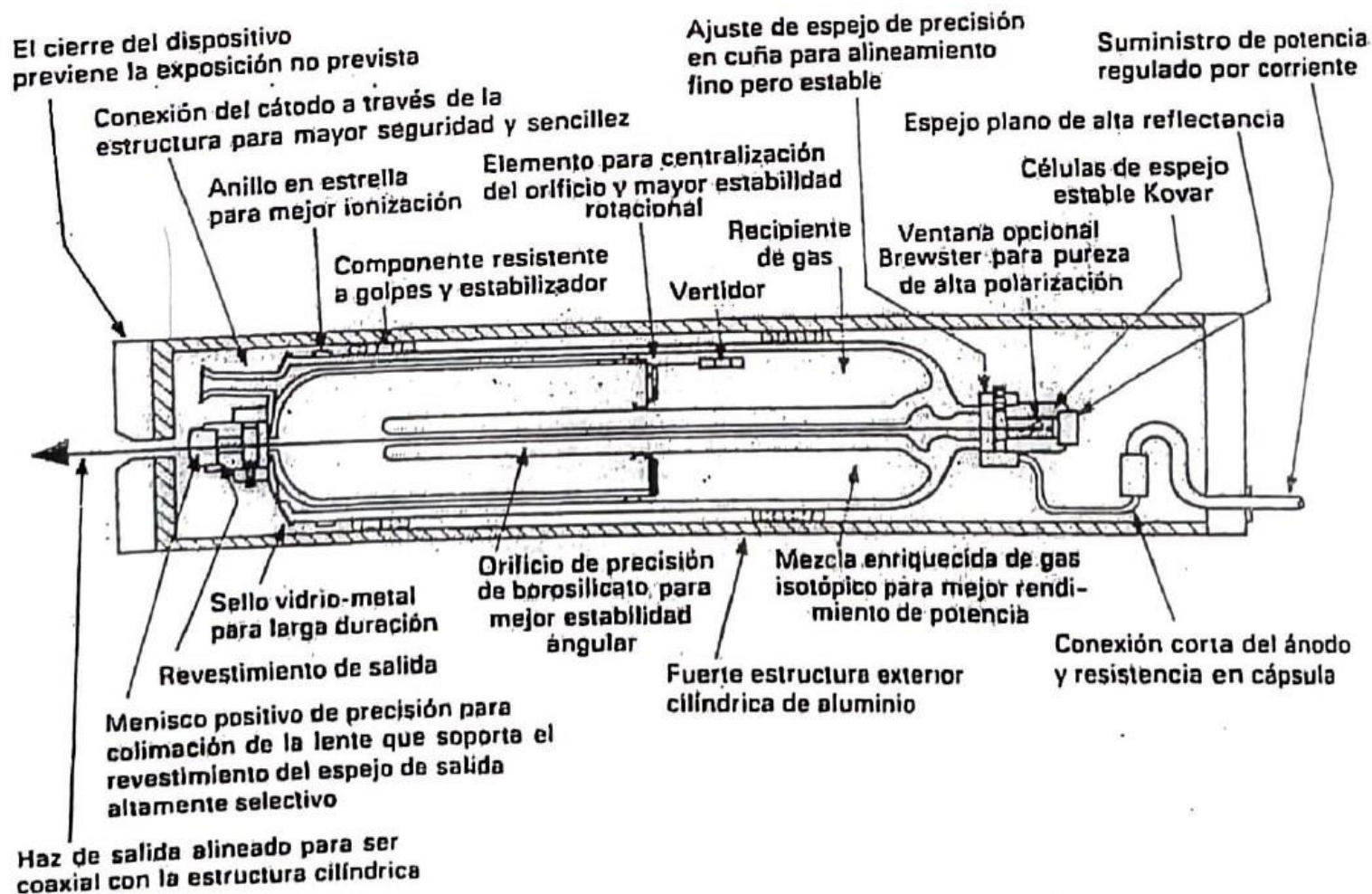
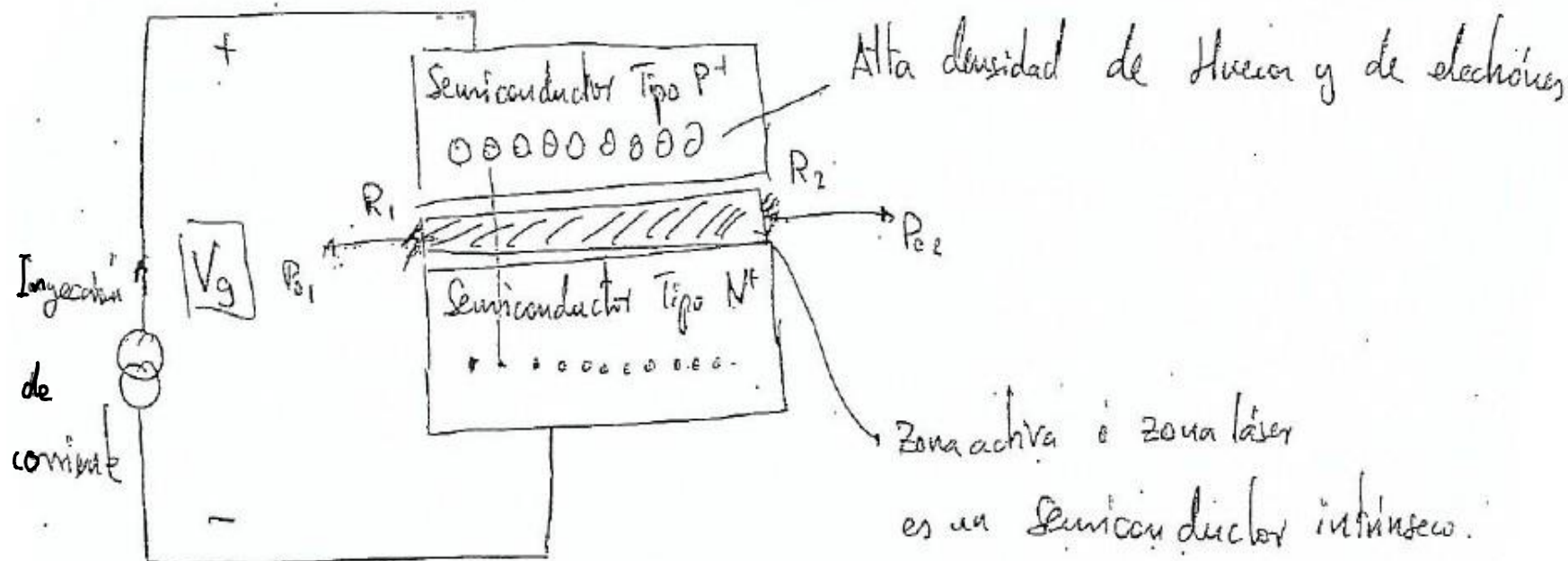
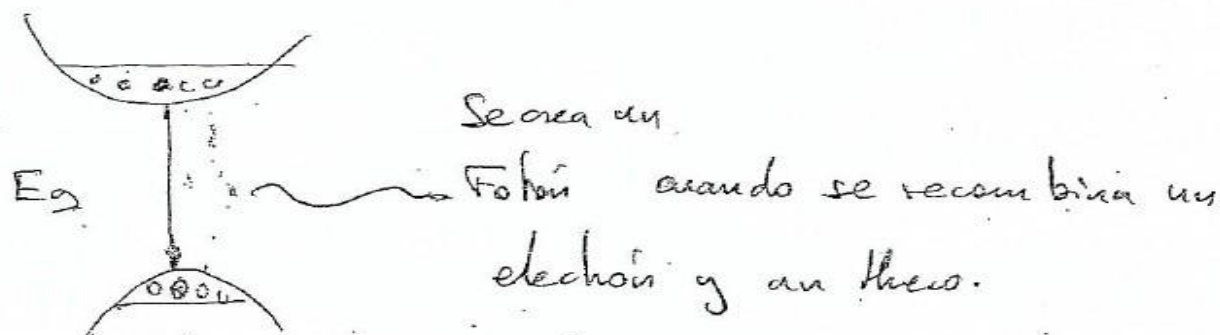
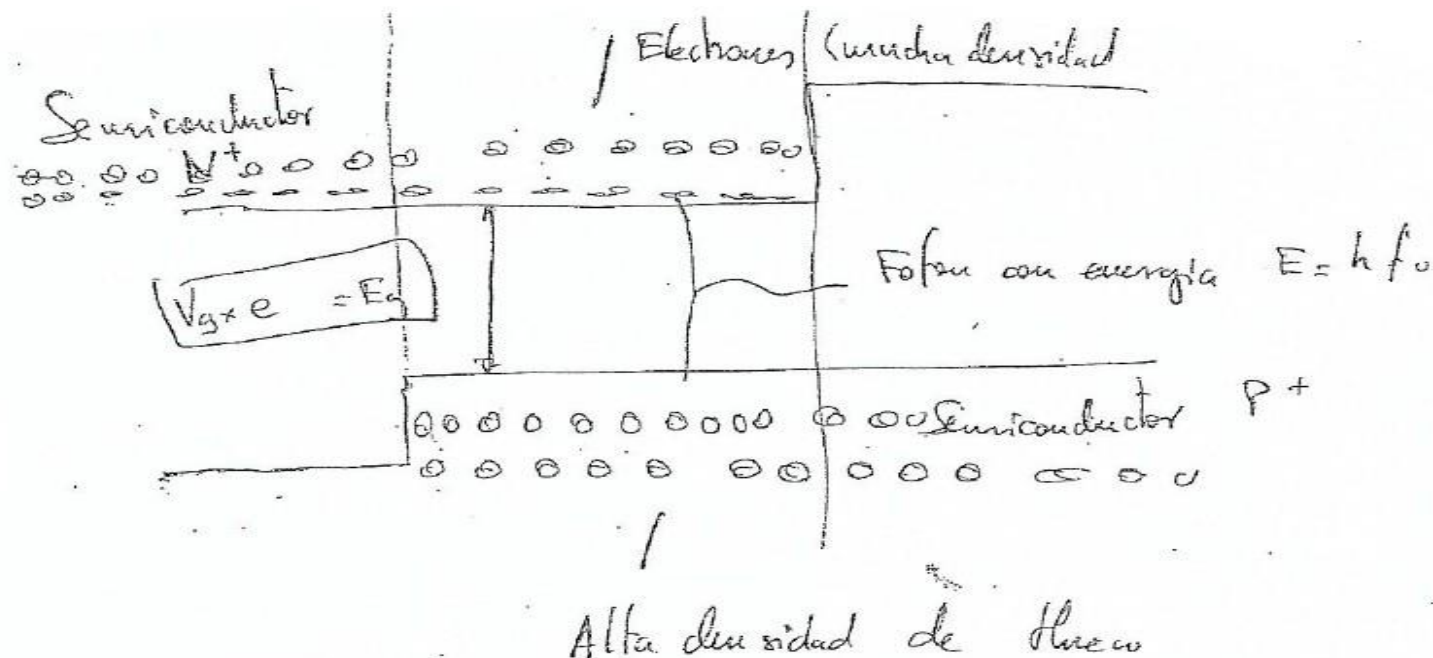


Figura 9.8 Estructura interna de un láser de HeNe de 5 mW disponible comercialmente (Cortesía de Melfes Griot).

2.3.-LASERES DE SEMICONDUCTOR

Láser de Semiconductor (Láser de inyección de corriente)
Son estructuras láser utilizando diodos electrónicos (PN)





Diodos de láser de heterounión doble (DLHD)

Estos láseres pertenecen a la variedad de geometría de bandas. La figura 9.11 representa mediante diagramas la estructura de estratos múltiples de este dispositivo, mientras que la figura 9.12 muestra los niveles de energía de la parte activa de su sección transversal. Antes de seguir adelante, puede resultar útil revisar de nuevo algunos aspectos de las secciones 3.2.2 y 3.3.1 (sobre todo las figuras 3.6 y 3.8) relacionadas con la inyección de electrones en uniones PN operadas en MPC y a las secciones 5.3.1-5.3.3 (en particular las figuras 5.7 y 5.8) en relación con el uso de heterouniones para confinamiento óptico y eléctrico.

La idea que sustenta el uso de geometría de bandas y heterouniones es conseguir que todo lo que ocurra sea funcionalmente importante dentro de un volumen pequeño de material. Si se consigue hacer fluir la corriente I_F del diodo láser a través de un canal muy estrecho, se podrían alcanzar grandes densidades de corriente con un umbral bajo de intensidad I_u (el valor más pequeño de I_F que provoca la acción del láser). En la actualidad, se ha obtenido este límite y son normales los valores de I_u que comprenden cifras desde 30 a 200 mA. Si se pudiera restringir la recombinación de electrón-hueco a un volumen pequeño de material, grandes densidades de fotones aumentarían la posibilidad de emisiones estimuladas. A este respecto, se han logrado volúmenes de unos $300 \mu\text{m}^3$. Por último, si se pudiera conducir la luz en una banda de material lo suficientemente delgada como obtener un comportamiento de guíaonda, su propagación/amplificación sería casi unidireccional y produciría una intensificación de la acción de láser. En el ejemplo que se muestra más adelante (y en muchos otros DLHD) se utiliza una banda de material de $0,1 \mu\text{m}$ de espesor (una fracción de la longitud de onda).

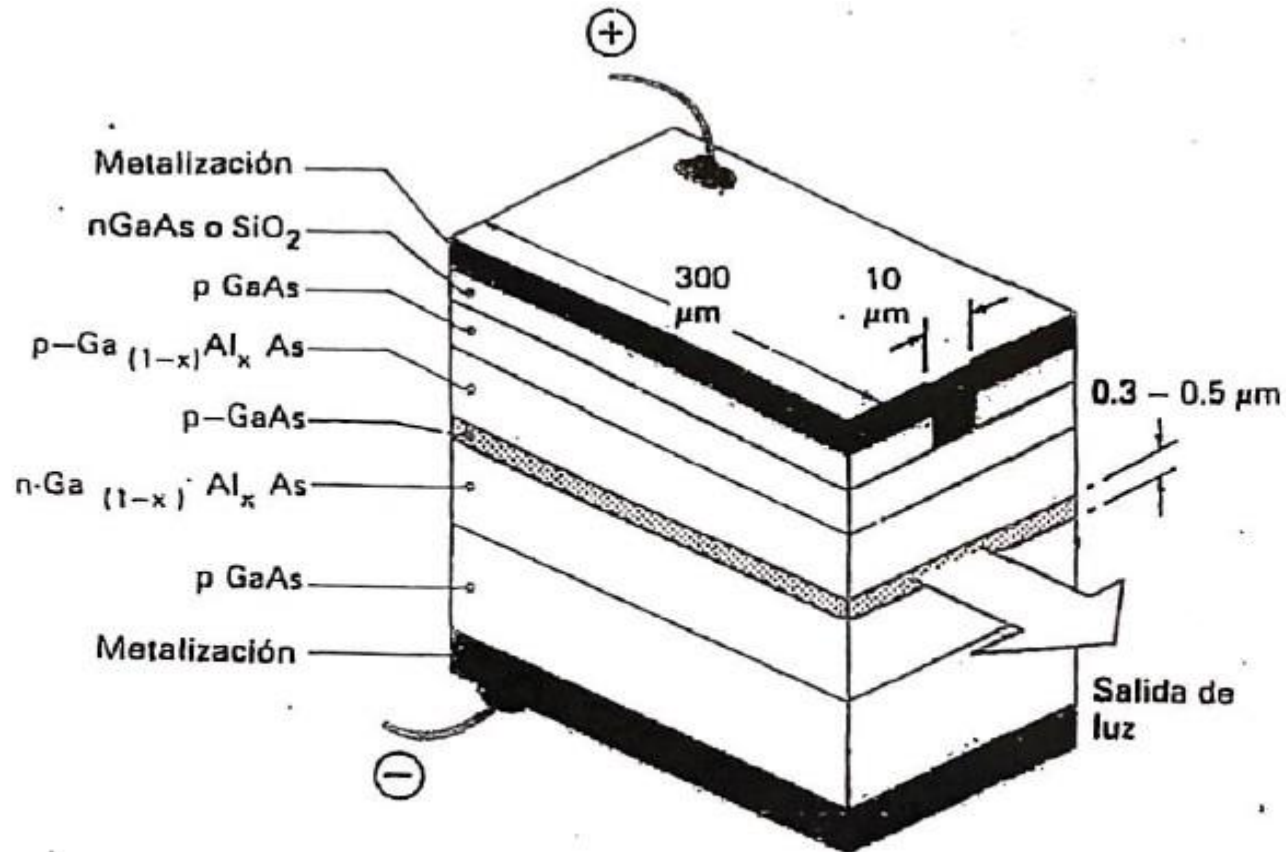


Figura 9.11 El dispositivo de láser tiene una estructura de capas (geometría de bandas de heterounión doble).

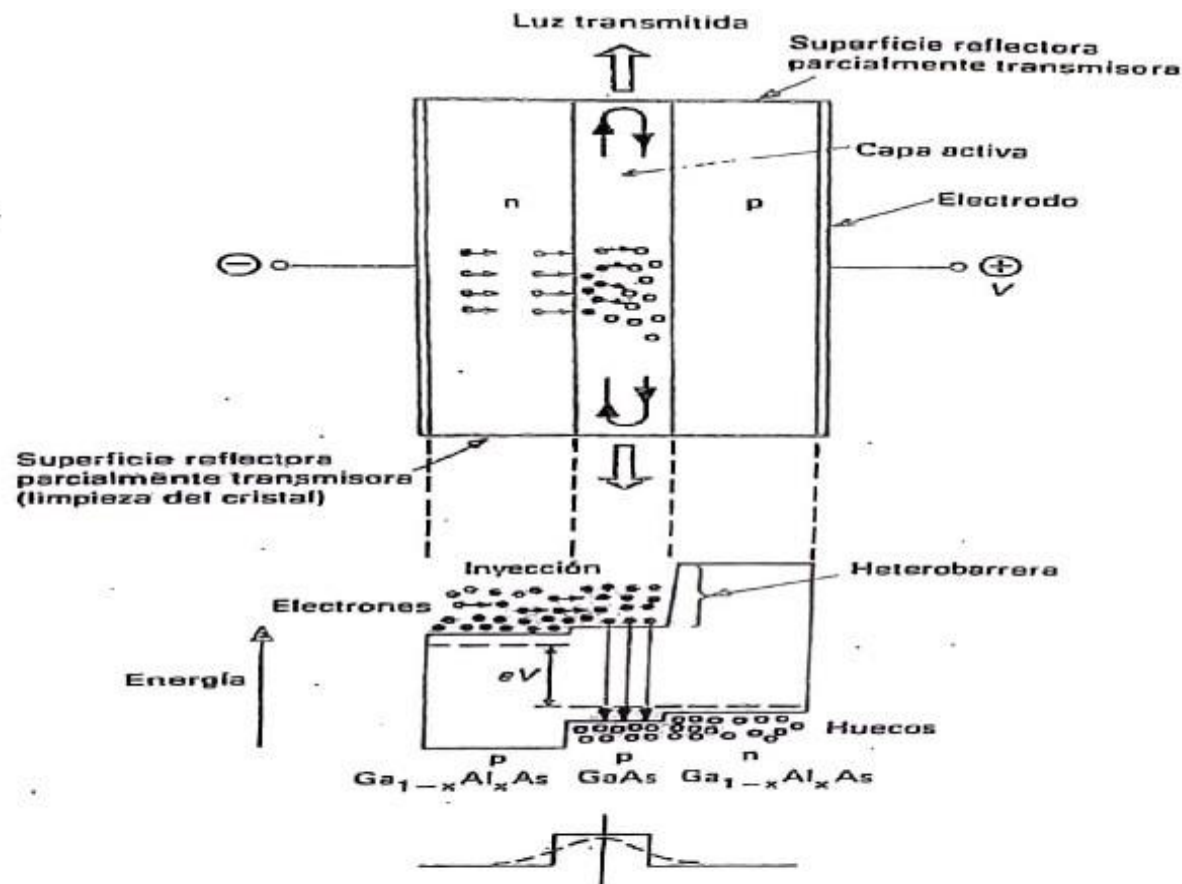
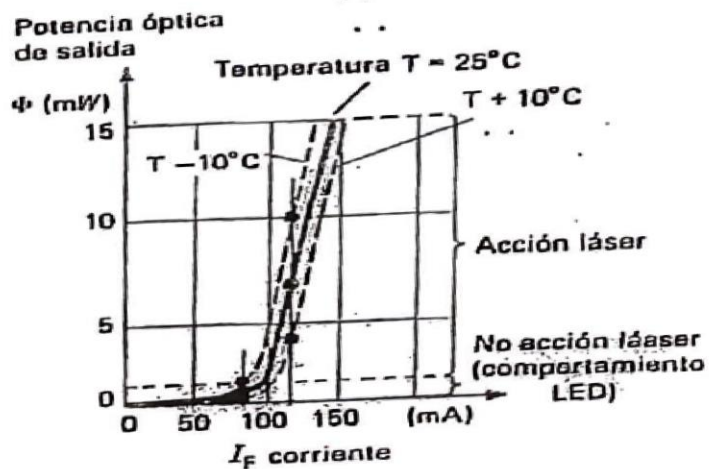
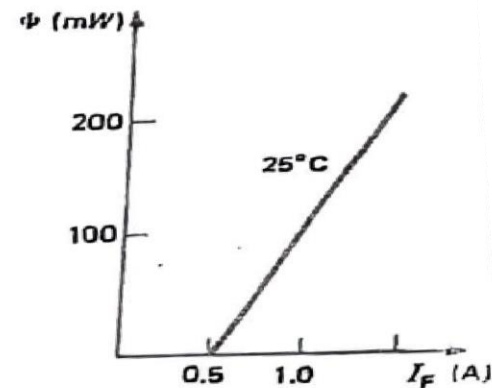


Figura 9.12 Diagrama de niveles de energía para un DLHD de polarización directa del tipo que se muestra en la figura 9.11.

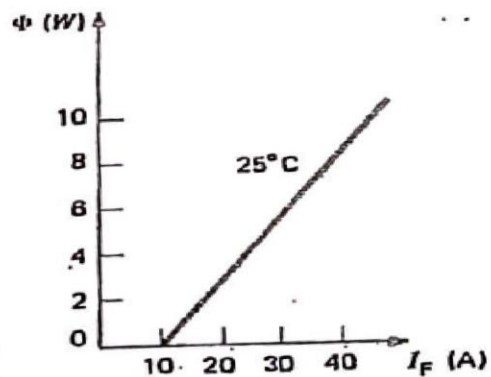
En la práctica, el chip activo tiene una estructura de capas (figura 9.11), que se obtiene por medio de un crecimiento epitaxial (una continuación de la estructura reticular del cristal) en el sustrato de GaAs y una adecuada contaminación. En algunos de ellos se añaden al retículo átomos de aluminio para sustituir al galio.



(a)



(b)



(c)

Figura 9.13 Potencia óptica de salida ϕ frente a una corriente de excitación I_F : (a) DLHD de geometría de bandas, (b) DHLD sin geometría de bandas, (c) DLHS.