

# Laser 와 그應用

朴 寅 用\*

## 1. 序 言

Laser란 말은 light amplification by stimulated emission of radiation의 준말이며, 一名 optical maser(micro-wave amplification by stimulated emission of radiation)라고도 불리운다.

原子的 energy 準位の轉移와 더불어 放出되는 電磁波의 誘導放出을 利用하여 micro 波의 增幅 또는 發振作用을 하는 maser 原理를 光波領域에 까지 發展시켜 光波의 增幅 또는 發振作用을 하게끔 하는 것을 laser 라고 한다.

光波도 電子波이므로 laser의 原理는 maser의 原理와 同一한 것이며 다만 그 應用波長帶가 micro 波임에 比하여 光波(赤外線, 可視光線, 紫外線)이란 差 뿐이다.

電磁波의 自然放出과 誘導放出의 比는 振動數(周波數)의 3 乘에 比例하므로 光波의 誘導放出을 利用한 laser의 實現에는 많은 難關이 있었으나, 1930 年에 Maiman이 "루비" laser의 發振에 成功한 以來 急速히 發展하여 現在로서는 數 10 種의 固體 및 氣體에 對한 發振 成功이 報告되었으며 半導體 laser의 出現도 볼 수 있게 되었다.

Laser 光이 가진 優秀한 特性 即 單色性, 可干涉性, 指向性 등은 基礎 및 應用科學研究上에 많은 興味를 끌고 있으며 laser 光을 搬送波로 利用한 通信工學上의 應用, laser 光의 可干涉性과 指向性을 利用한 計測工學上의 應用, 高 energy 密度를 얻을 수 있는 laser 光에 依한 加工技術 및 醫療上의 應用 또는 兵器로서의 應用等 實로 驚異的인 多方面應用的 展望이 보인다. 1964 年度의 노벨 物理學賞이 바로 이 maser 原理 및 그 應用開發에 貢獻한 다운즈, 바소프, 프노호로프 3 教授에게 주어졌던 것으로도 이의 重要性을 엿볼 수 있다.

### 註

美國 M.I.T.의 C.H. Townes 教授는 1953 年 6 月 J. Weber가 "amplification of microwave radiation by

\*原子力研究所·電子工學研究室

substances not in thermal equilibrium"; I.R.E. Trans. ED-3(June 3, 1953)이란 論文으로 maser 可能性을 最初로 發表한 것과는 獨立된 研究로서 Weber와 같은 着想을 얻어서 "A molecular microwave amplifier, oscillator and frequency standard"; I.R.E. conv. record. Pt. 10, p 180(1955)을 1955 年發表하므로써 maser에 向하는 具體的인 一步를 디디게 했으며 1958 年에는 Showlow와 共同으로 發表한 그의 歷史的인 論文 "Infrared and optical masers" phys. Rev. p.112, 1964 (Dec 1958)에서 maser 原理를 光周波數領域에까지 擴張하여 光의 發振增幅의 可能性을 明示했다.

蘇聯의 "바소프" "프노호로프"兩教授도 獨立된 研究로서 maser 및 laser 開發에 顯著的인 貢獻을 한 것으로 報導되었으나 筆者는 아직 兩教授의 論文을 읽지 못하였으므로 論評할 수 없다.

이와 같은 laser의 原理 및 그 實例와 laser 光의 特色과 그의 應用面 및 展望을 紹介하고자 한다.

## 2. Laser의 原理

原子는 原子核과 그 周圍를 돌고 있는 電子들로서 構成되는데 그 電子들은 各各 몇개의 energy 準位에 該當하는 各各의 軌道로만 돌고 있다. 그런데 어떤 電子가  $E_2$ 란 높은 energy 準位에서  $E_1$ 의 낮은 準位로 轉移하면 그 energy 差에 該當한 振動數(周波數)를 가진 電子波를 放出하게 된다.

$$\text{即 } h\nu = E_2 - E_1 = \Delta E \quad (1)$$

但  $h$ : Planck 定數

$\nu$ : 電磁波의 振動數(周波數)

이와 같은 現象은 螢光燈의 發光原理 등으로 잘 알려진 事實이다. 이와 같이 物質(原子, 分子, 電子, 이온 등의 微視的인 粒子를 總稱한다.)은 어떠한 energy 準位에 있고 그 準位の 轉移와 더불어 Bohr의 振動條件 (1) 式을 滿足하는 周波數를 가진 電磁波의 放出 또는 吸收 現象이 이어나며, 그 轉移過程은 電磁波의 自然放出, 誘導放出 및 吸收의 3 種으로 나누어 생각할 수 있다.

### 가. 自然放出

높은 energy 準位  $E_2$ 에 있는 原子는 不安定하여 外 的인 誘引 없이도 自然的으로 보다 安定된 낮은 準位

$E_1$ 으로 轉移하여 (1)式에 依한 電磁波를 放出하게 된다. 이와 같은 自然放出이 單位時間內에 이루어날 수 있는 確率は 다음 式으로 주어진다.

$$A = \frac{1}{\tau_s} = \frac{64 \pi^4 \nu^3}{3 \hbar c^3} |\mu_{2,1}|^2 \quad (2)$$

但  $\mu_{2,1} = \int \phi_2 \mu \phi_1 d\tau$

$\tau$ :  $E_2$ 準位에 머물 수 있는 平均壽命

$\phi_2, \phi_1$ :  $E_2$  및  $E_1$  energy 準位の 波動函數

$\mu$ : 雙極子의 能率

(2)式에서 알 수 있는 바와 같이 自然放出確率  $A$ 는 振動數  $\nu$ 의 3 乘에 比例하여 可視光線에 있어서는 一秒當  $10^7 \sim 10^8$  程度로 相當히 큰 값이나 振動數가 적은 micro 波에 있어서는 問題되지 않을 程度로 적다.

### 나. 誘導放出 및 吸收

原子系에 外部로부터 energy 準位差  $\Delta E = h\nu$ 에 該當하는 周波數  $\nu$ 를 가진 電磁波를 가해주면 그 輻射密度(energy 密度)  $\rho(\nu)$ 에 比例하는 確率로서 높은 準位에 있는 原子는 入射된 電磁波와 同相 同周波數의 電磁波를 放出하고 낮은 準位로 轉移하고 낮은 準位에 있는 電子는 電磁波를 吸收하여 높은 準位로 轉移한다. 이 現象을 各 各 誘導放出 및 誘導吸收이라고 한다.

誘導放出이 이루어나는 確率을  $B_{21}\rho(\nu)$  誘導吸收가 이루어나는 確率을  $B_{12}\rho(\nu)$ 라고 하면

$$B = B_{21} = B_{12} \quad (3)$$

의 關係가 成立되며  $B$ 의 값은 量子力學的으로 다음과 같이 導出된다.

原子系에 依한 電磁波의 放出과 吸收가 平衡을 이루었을 때를 생각하면

$$N_2\{B_{21}\rho(\nu) + A\} = N_1B_{12}\rho(\nu) \quad (4)$$

가 成立된다.

但  $A$ : 自然放出確率  $= 1/\tau_s$

$N_1$ :  $E_1$  energy 準位에 있는 原子數

$N_2$ :  $E_2$  Energy 準位에 있는 原子數

그리고 原子系가 熱平衡狀態에 있을 때의 各 energy 準位에 있는 原子數는

Boltzman의 分布式

$$N_2/N_1 = \exp\{-(E_2 - E_1)/kT\} = \exp(-hD/kT) \quad (5)$$

但  $k$ : Boltzman 定數

$T$ : 絕對溫度

에 따르며 輻射密度  $\rho(\nu)$ 는 Plank의 輻射公式

$$\rho(\nu) = \frac{8 \pi h \nu^3}{c^3 \{\exp(h\nu/kT) - 1\}} \quad (6)$$

但  $c$ : 光速度

로 주어진다. (4)式에 (2), (5), (6)式을 代入하여 整理하면

$$B = B_{12} = B_{21} = \frac{8 \pi^3}{3 \hbar^2} |\mu_{12}|^2 \quad (7)$$

가 된다.

誘導放出과 吸收는 同時에 이루어나므로 結果的으로 單位體積當에 放出 또는 吸收되는 電磁波의 電力은 1個의 放出當의 energy가  $h\nu$ 이므로

$$\begin{aligned} \Delta P &= P_e - P_a = N_2 B \rho(\nu) h\nu - N_1 B \rho(\nu) h\nu \\ &= (N_2 - N_1) h\nu B \rho(\nu) \end{aligned} \quad (8)$$

但  $N_2 > N_1$ : 일때는  $\Delta P$ 는 正의 값을 가져 誘導放出을 意味하며

$N_2 < N_1$ : 일때는  $\Delta P$ 는 負의 값을 가져 吸收를 意味한다.

原子系가 熱平衡狀態에 있을 때는 (5)式의 Boltzman 分布式에서 絕對溫度  $T$ 가 正의 값을 가지는 限  $N_2 < N_1$ 이므로 結果的으로 吸收現象만이 이루어난다. 萬若에 어떠한 方法로서  $N_2 > N_1$ 인 狀態를 얻을 수 있다면 結果的으로 誘導放出이 이루어나서 入射電磁波의 增幅現象이 이루어날 것이다.

### 다. 反轉 分布

上述한 것과 같이 吸收를 補償하고도 남는 正味の 誘導放出이 原子系에 이루어나게 하려면 어떠한 方法으로든지  $N_2 > N_1$ 의 分布狀態를 實現하여야 한다. 이와 같은 狀態는 (5)式의 Boltzman 分布式에 있어서 絕對溫度  $T$ 가 負의 값을 가지는 狀態다. 따라서 이와같은 狀態를 負溫度狀態라고 稱하며 또는 反轉分布가 이루어졌다고 말한다. laser 作用의 關鍵은 바로 이 反轉分布를 實現시키는 일이다.

現在까지 몇가지 方法으로서 反轉分布를 얻는데 成功하고 있으나 그중 가장 널리 使用되는 方法은 3個의 準位 또는 4個의 準位間의 轉移를 利用한 3準位法 또는 4準位法이다.

그림 1은 4準位 laser의 原理를 圖示한 것인데 이 그림에 있어서 ①準位와 0準位 사이의 energy 差가  $kT$ 와 거의 같거나 그보다 적을 때는 3準位 laser가 된다.

그림 1에 있어서 基底狀態인 0準位에는 原子를 外

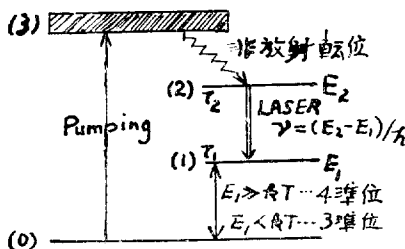


그림 1. 3準位 또는 4準位 laser

部로부터 適當한 方法으로 energy를 供給하여 ③準位에 勵起한다. 이와 같은 勵起를 pumping이라고 하며 固體 laser에 있어서는 光으로 勵起하므로 optical pumping이라고 말한다. ③準位에 올라간 原子는 熱平衡狀態의 分布에 돌아가려고 한다. 即 自然放出에 依한

또는 系問의 衝突 및 結晶格子와의 熱的相互作用에 依한 非放射性轉移로서 보다 安定된 準位로 轉移하게 된다. 이때에 ③準位에서 ②準位로 轉移하는 確率  $M$ 가 크고 準位 ②에 있는 原子의 平均壽命  $\tau_2$ 가 ①準位の壽命  $\tau_1$ 보다 길 때에는 ②와 ①準位間에 反轉分布가 이루어진다. 이 狀態에 振動數  $\nu=(E_2-E_1)/h$ 인 電磁波가 入射되면 ②準位에서 ①準位로 轉位하며 誘導放出을 하게 되어 入射波와 同相, 同振動數의 增幅된 電磁波 即 laser 光을 얻게 된다. 이러한 原子系를 共振器 속에 넣어서 誘導放出된 것이 適當히 feed back 되도록 하면 自勵發振을 이르게 된다.

라). 發振條件

光의 境遇도 發振하기 爲해서는 그 電磁波 energy의 減衰되는 率 보다 增加하는 率이 더 크지 않으면 안된다. 即 發振條件은

$$\Delta P_e < \Delta P_c \tag{9}$$

但  $\Delta P_e$ : 誘導放出에 依한 增加率

$\Delta P_c$ : 共振器에 依한 損失率

로서 주어진다.

共振器의 反射鏡의 反射率을  $(1-\alpha)$ 라고 하고 反射鏡 間距離를  $d$ 이라고 하면 共振器를 往復하는 光束은 反射鏡에 올 때마다  $\alpha$ 의 率로 損失된다. 그 速度는 光速  $c$ 이므로 每秒當 損失될 率은

$$\left. \begin{aligned} \alpha \left( \frac{c}{d} \right) &= \frac{1}{\tau_p} = \frac{2\pi\nu}{Q} \\ Q &= 2\pi\nu\tau_p = \frac{2\pi d}{\alpha\lambda} \end{aligned} \right\} \tag{10}$$

이다. 여기서  $\tau_p$ 는 共振器의 損失에 依한 光速의 減衰의 時定數를 意味하며  $Q$ 는 周波數  $\nu$ 에 對한 選擇率이다.

따라서

$$\Delta P_c = \frac{\alpha c}{d} \rho(\nu) = \frac{2\pi\nu}{Q} \rho(\nu) \tag{11}$$

誘導放出에 依한 增加率은 (8)式에서

$$\begin{aligned} \Delta P_e &= (N_2 - N_1) h\nu B\rho(\nu) \\ &= (N_2 - N_1) \frac{8\pi^3\nu^3}{3h} |\mu_{21}|^2 \rho(\nu) \end{aligned} \tag{12}$$

(11), (12)式을 (9)式에 代入하여 整理하면 發振條件으로서

$$\Delta N = N_2 - N_1 > \frac{3h}{4\pi^2 |\mu_{21}|^2 Q} \tag{13}$$

但 上式은  $\Delta P_e$  計算에 있어서 入射光  $\rho(\nu)$ 의 波長分布가 스펙틀 線幅에 比하여 充分히 넓다는 假定下에 算出된 結果이고 實際에 있어서는  $\rho(\nu)$ 는 單色性이므로 그에 對한 스펙틀 線形과의 選擇性을 考慮하면 近似的으로

$$\Delta N = N_2 - N_1 > \frac{3h\nu}{4\pi |\mu_{21}|^2 Q} \tag{14}$$

란 發振條件이 導出 되다.

即 laser 發振을 이르게하려면 高 energy 準位の 原子密度와 低 energy 準位の 原子密度의 差 即 反轉粒子의 密度가 (14)式에서 주어진 값 이상이 되어야 한다.

連續的으로 發振하기 爲해서는 高準位에서 低準位로 떨어던 分을 恒常補充해 주는 pumping이 實現되어야 할 것이다. 이와 같이 平衡粒子의 數(密度)를 求해 보기로 한다. 그림(2)는 그 動作狀況을 나타낸 것이다. 基底準位로부터  $E_1$  및  $E_2$  準位에 pumping되는 率(每秒當의 原子數)이 각각  $R_1, R_2$ 이며 自然放出의 確率  $A_1, A_2$  및 誘導放出의 率  $W_i = B\rho(\nu)$ 로서 循環動作을 하고 있는 狀態圖이다.

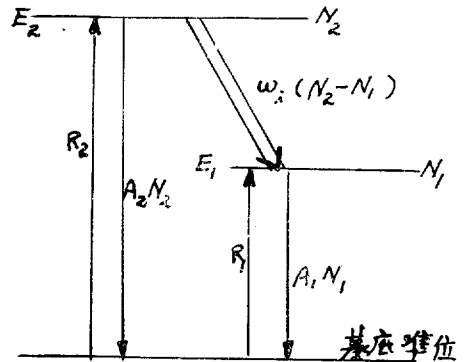


그림 2. 粒子分布 平衡圖

이때의 平衡關係式은

$$\left. \begin{aligned} R_2 - A_2 N_2 - W_i (N_2 - N_1) &= 0 \\ R_1 - A_1 N_1 + A_2 N_2 + W_i (N_2 - N_1) &= 0 \end{aligned} \right\} \tag{15}$$

上式에서

$$\begin{aligned} \Delta N = N_2 - N_1 &= \frac{R_2 \left\{ 1 - \frac{A_2}{A_1} \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \right\}}{W_i + A_2} \\ &= \frac{R_2'}{W_i + A_2} \end{aligned} \tag{16}$$

여기에서 laser 發振을 얻는데 絕對로 必要한 條件은  $\Delta N$ 가 正의 값을 가지는 것, 即

$$1 > \frac{A_2}{A_1} \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \dots \dots \dots \tag{17}$$

이다. 바꾸어 쓰면,

$$\frac{\tau_{s2}}{\tau_{s1}} > 1 + \frac{R_1}{R_2} \quad (18)$$

即 高準位の 壽命  $\tau_{s2}$  가 低準位の 壽命  $\tau_{s1}$  보다 크지 않으면 안된다. 따라서 laser發振은 어떠한 準位間에서도 일어나는 것이 아니라 上式條件을 滿足할 수 있는 準位間에서만 可能한 것이다.

以上으로서 laser의 原理가 理解될 것이다. 그러나 實在의 laser를 實現시키는데 必要한 理論은 이 밖에도 laser의 入力 및 出力에 關한 理論, 共振器에 關한 理

論 등이 必要하나 紙面關係上 省略한다.

### 3. Laser의 實例

1960年에 Maiman이 루비로서 最初의 laser發振의 成功을 發表한 以來 不過 數年을 經過한 現在로서는 數十種의 材料에 依한 laser發振의 成功이 發表 되었다. 이들을 大別해보면 固體 laser, 氣體 laser, 半導體 laser (injection laser)로 種別할 수 있으며 筆者로서 얻어진 集計에 依하면 表 1, 2, 3과 같다.

表 1. 固體 laser의 材料와 種類

能動 ion	每體結晶	發振波長 ( $\mu$ )	스피클 수	溫度 ( $^{\circ}$ K)	動作	laser 轉移	轉位下 端準位 ( $\text{cm}^{-1}$ )	pump ing 波長( $\mu$ )	備考
Cr <sup>2+</sup>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.6943 } (R <sub>1</sub> )	2	295	PW	<sup>2</sup> E(E)- <sup>4</sup> A <sub>2</sub>	0	0.5 ~ 0.6	Cr 含有量 ~0.05%
		0.6934 } (R <sub>1</sub> )		77	CW				
		0.6929 (R <sub>2</sub> )		295	PW	<sup>2</sup> E(2A)- <sup>4</sup> A <sub>2</sub>	0	0.35~0.45	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.7041 (N <sub>1</sub> )	2	77	PW		~100	0.5 ~ 0.6	//
		0.7009 (N <sub>2</sub> )							
Pr <sup>3+</sup>	CaWO <sub>4</sub>	1.0468	1	4, 20, 77	//	<sup>1</sup> G <sub>4</sub> - <sup>3</sup> H <sub>4</sub>	377	0.45~0.5	
	SrMoO <sub>4</sub>	//	1	//	//	//	//	//	
	CaWO <sub>4</sub>	1.0576~1.0650	5	77~85	CW	<sup>4</sup> F <sub>3/2</sub> - <sup>4</sup> I <sub>11/2</sub>	~2000	0.57~0.6	
		1.0582, 1.0652	2	295	PW				
	SrWO <sub>4</sub>	1.0574~1.0627	3	77	PW	//	//	//	//
		1.063	1	295	//				
	SrMoO <sub>4</sub>	1.059 ~ 1.0652	5	77	//	//	//	//	//
		1.0576, 1.0643	2	295	//				
	CaMoO <sub>4</sub>	1.067	1	77	//	//	//	0.57~0.59	
		1.0673		295					
	PbMoO <sub>4</sub>	1.0586	1	295	//	//	//	//	
	CaF <sub>2</sub>	1.0457	1	77	//	//	//	0.7 ~ 0.8	0.56~0.58
	SrF <sub>2</sub>	1.0437	1	77	//	//	//	0.72~0.75	
1.0370		1	295	//	//	//	0.78~0.81		
BaF <sub>2</sub>	1.060	1	77	//	//	//	0.57~0.60		
LaF <sub>2</sub>	1.0399, 1.0631	2	77	//	//	//	0.5~0.6		
	1.0633	1	295	//	//	//			
Ho <sup>3+</sup>	CaWO <sub>4</sub>	2.046, 2.059	2	77	//	<sup>5</sup> I <sub>7</sub> - <sup>5</sup> I <sub>8</sub>	~230	0.44~0.46	
		2.092	1	//	//	//	//	0.40~0.66	
Er <sup>3+</sup>	CaWO <sub>4</sub>	1.612	1	//	//	<sup>4</sup> I <sub>13/2</sub> - <sup>4</sup> I <sub>15/2</sub>	375	0.38~0.52	
Tm <sup>3+</sup>	CaWO <sub>4</sub>	1.911, 1.916	2	//	//	<sup>3</sup> H <sub>4</sub> - <sup>3</sup> H <sub>6</sub>	~325	0.46~0.48	1.918 $\mu$ 正觀測
		1.972	1	//	//	//	//	1.7~1.8	

能動ion	母體結晶	發振波長(μ)	스펙트럼數	溫度(°K)	動作	laser 轉移	轉立下端準位(cm <sup>-1</sup> )	pumping 波長(μ)	備考
Sm <sup>2+</sup>	CaF <sub>2</sub>	0.7083	1	4, 20	//	<sup>5</sup> D <sub>0</sub> - <sup>7</sup> F <sub>1</sub>	263	0.425~0.5 0.59~0.65	
	SrF <sub>2</sub>	0.6969	1	4	//	//	~270	0.4~0.45 0.57~0.65	
Dy <sup>2+</sup>	CaF <sub>2</sub>	2.36	1	4, 20, 27, 77,	PW CW	<sup>5</sup> I <sub>7</sub> - <sup>5</sup> I <sub>8</sub>	90	0.3~1.0	
Tm <sup>2+</sup>	CaF <sub>2</sub>	1.1153	1	4, 20, 77, 4, 27,	PW CW	<sup>2</sup> F <sub>5/2</sub> - <sup>2</sup> F <sub>7/2</sub>	0	0.28~0.34 0.39~0.46 0.53~0.63	Zeeman 變調可能
U <sup>3+</sup>	CaF <sub>2</sub>	2.6130	1	295	PW	<sup>4</sup> I <sub>11/2</sub> - <sup>4</sup> I <sub>9/2</sub>	609	0.88~0.92	
		2.57, 2.57	3	<900	CW		0	0.5~0.6	
		2.24		77	PW				
	SrF <sub>2</sub>	2.407	2	20, 77, 90	//	//	34	1.0~1.3 0.4~0.6	
Pr <sup>3+</sup>	Ba 쿼운 硝子	1.047	1	77	//	<sup>1</sup> G <sub>4</sub> - <sup>3</sup> H <sub>4</sub>		0.45~0.5	
Na <sup>3+</sup>	Ba 쿼운 硝子	1.06<70°A	多數	77 300	PW CW	<sup>4</sup> F <sub>3/2</sub> - <sup>4</sup> I <sub>11/2</sub>	~2000	0.5~0.6 0.7~0.9	
	濃후린트 硝子	1.06		300	CW	//	//	//	
	Li-Mg-Al-SiO <sub>3</sub> 硝子	1.06		77	PW	//	//	//	
Gd <sup>3+</sup>	Na-Ca-Al-SiO <sub>3</sub> 硝子	0.9180	1	80	PW	<sup>4</sup> F <sub>3/2</sub> - <sup>4</sup> I <sub>9/2</sub>	~0	0.85~0.9	
	Li-Mg-Al-SiO <sub>3</sub> 硝子	0.3125	1	78	PW	<sup>6</sup> P <sub>7/2</sub> - <sup>8</sup> S <sub>7/2</sub>		0.2741 0.2770	
Ho <sup>3+</sup>	//	>1.95	1	//	//	<sup>5</sup> I <sub>7</sub> - <sup>5</sup> I <sub>8</sub>		0.44~0.46	
Yb <sup>3+</sup>	//	1.015	1	//	//	<sup>2</sup> F <sub>5/2</sub> - <sup>2</sup> F <sub>7/2</sub>		0.91 0.95 0.98	

但 PW; pulse 發振  
CW; 連續發振

表 2. 氣體 laser 의 材料와 種類

能動氣體	混合氣體	發振波長範圍(μ)	發振스펙트럼數	勵起方法	動作壓力
Ne	He-Ne	0.5939~3.3913	28	衝突에 의한 勵起 He 原子에서 Ne 原子에의 勵起傳達	He : 0.5~2 Ne : 0.05~0.2
Cs	Cs	3.20, 7.18	1	光 pumping	
O	Ne-O <sub>2</sub> Ar-O <sub>2</sub>	0.8446	1	原子와 分子의 衝突에 의한 分子 解離勵起	Ne : 0.35 O <sub>2</sub> : 0.014 Ar : 1.3 O <sub>2</sub> : 0.036
	Ne-CO <sub>2</sub> Ne-NO	0.8446	1		

能動氣體	混合氣體	發振波長範圍 ( $\mu$ )	發振스파톨數	勵起方法	動作壓力
C	He-CO Ne-CO	1.0691 1.4540	1 1		
N	He-NO He-N <sub>2</sub> O	1.3588 1.4550	1 1		
Br	Ne-Br <sub>2</sub>	0.84~0.85	4		
He	He	2.0603	1	電子衝突에 의한 勵起	8
Ne	Ne	1.153~34.55	~50	//	0.02~0.2
Ar	Ar	1.618~26.9	32	//	0.03~0.05
Kr	Kr	1.690~7.06	21	//	0.03~0.07
Xe	Xe	2.0261, 3.5080 5.5734	3	//	0.01~0.03
	He-Xe	2.0261~18.5	23	//	Xe : 0.01~0.04 He : 0.3~5
I	I	3.236, 3.431	2	//	
Hg	Hg	1.529, 1.813	2	//	
	Hg-He Hg-Ne	1.5295, 1.813	2	//	He : 0.1~10 Ne : 0.1~3
N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	0.7580~1.2347 0.3314~0.40	>30 30	//	1~4

### 가. 固體 laser

現在까지 開發된 固體 laser 는 第一表와 같이 多種多樣的 것이 있으나 그 代表的인 것은 Maiman 이 最初로 發振에 成功한 루비 laser 이다. 루비는 三準位 laser

(反轉分布 參照)의 代表的인 材料로서 루비(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 中에 0.05% Cr 含有)中의 Cr<sup>3+</sup> 이온의 energy 準位圖 및 루비의 吸收 spectral 圖는 그림 3 과 같다. (但 laser 作用에 關係 없는 準位는 省略했음)

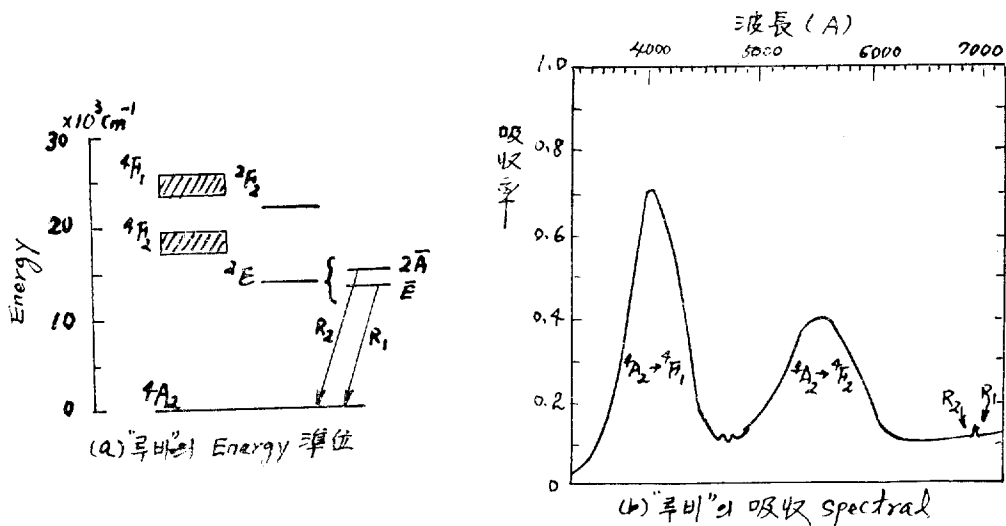


그림 3. 루비의 energy 準位 및 吸收 spectral

表 3. 半導體接合形 laser 의 材料와 種類

接合形材料	發振波長 ( $\mu$ )	發振波長帶域 ( $\mu$ )	溫 度 ( $^{\circ}$ K)	動 作	限界電流密度 (A/cm $^2$ )	
GaAs	0.8330~0.8360	0.2~30 $\times 10^{-4}$	4.2	PW	7~11 $\times 10^2$	
	0.84 ~0.85		77		8~20 $\times 10^3$	
	0.842		100		1.5 $\times 10^3$	
	0.9000		298		1.0 $\times 10^3$	
	0.8383	$\sim 2 \times 10^{-4}$	1.95~2.0 (He I)	CW	$\sim 74$	
0.853	$\sim 5 \times 10^{-4}$	77	1.7~4.0 $\times 10^{-2}$			
InAs	3.12 3.15	<35~70 $\times 10^{-4}$	4.2 77	PW	1.3 $\times 10^3$ ~ 10 $^4$	
	5.11~3.12 (印加磁界에 따라 變化)		$\sim 10 \times 10^{-4}$ (2本)		4.2	CW
InP	0.906 0.907	$\sim 1/2 \times 10^{-4}$ $\sim 1 \times 10^{-4}$	4.2 77	PW		
	0.902 0.905					0.3 $\times 10^{-7}$ (數本)
	Ga(As $_{1-x}$ P $_x$ )	0.7100	20~12 $\times 10^{-4}$	77	PW	1.1 $\times 10^3$
		0.62~0.84	(組成 x 를 變化하므로서 發振可能)			
(In $_x$ Ga $_{1-x}$ )As	1.77(x=0.65) 2.07(x=0.75)	6.5 $\times 10^{-4}$	1.9	PW	31 $\times 10^4$ (磁界 14KG)	
	0.84~3.1	(組成 x 를 變化하므로서 發振可能)				
$\alpha$ -SiC	0.4560	<5 $\times 10^{-4}$	295	CW	1.2 $\times 10^2$	

基底狀態  $^4A_2$ 에 있는 原子는 optical pumping 으로 勵起狀態  $^4F_1$ ,  $^4F_2$  準位에 勵起된다. 勵起狀態의 原子는 非放射性轉位(phonon 放出轉移)로서  $^2E$  準位에 轉位하며 이때의 轉位確率は  $^2E$ 에서  $^4A_2$ 에의 轉位確率보다 훨씬 크다. 따라서  $^2E$ 轉位의 原子數는 漸次增加하여  $^4A_2$  準位의 原子數보다 많아져서 負溫度狀態(反轉分布)를 이룬다.

루비네의 兩端은 反射膜으로서 銀 또는 誘電體多重膜을 coating 하여 共振器를 形成하고 있다. 이 共振器內에는  $^2E$ 에서  $^4A_2$ 로 의 自然放出에 依한 光이 있으므로 이 光波에 誘起된  $^2E$ 에서  $^4A_2$ 로 의 誘導放出에 依하여 增幅되어 發振에 이르게 된다. 發振된 laser 光은 한 쪽 反射膜이 若干의 透過率을 가지게끔 하므로서 그를 통하여 나오게 할 수 있다.

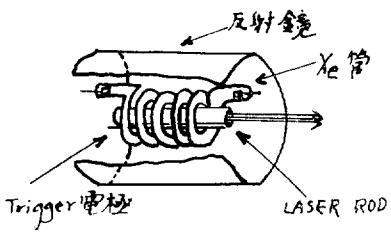
$^2E$ 準位는  $\bar{2A}$  및  $\bar{E}$ 의 2個의 準位로 나누어져 있는데 이 兩의 熱平衡에 到達하는 時間은  $^2E$ 의 壽命(常溫에서 3 msec)보다 훨씬 짧으므로 準位間의 分布는  $\bar{E}$ 의

것이  $\bar{2A}$ 의 것보다 많다. 그리고  $\bar{E}$ 에서  $^4A_2$ 로 轉移하는 確率が  $^2A$ 에서의 轉移確率보다 크므로,  $R_1$ 線(6943 Å)이 laser 光으로서 觀測된다. 그러나 共振器의 反射率이  $R_2$ 波長에 對해서는 크고  $R_1$ 波長에 對해서는 적은 反射鏡을 써서  $R_2$ 光의 發振을 觀測한 例도 있다.

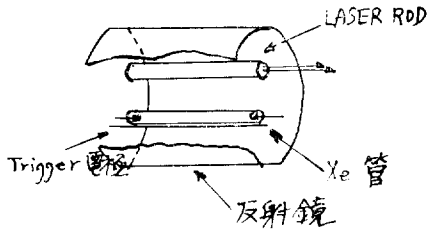
Optical pumping 에는 Xe 放電管의 光源을 利用한다. 放電光의 發光을 有効하게 루비에 加해주기 위하여 여러 가지 方法을 講求되고 있으나 그 代表的인 例는 그림 4와 같다. Xe 管은 電源部 condenser 에 蓄積된 energy 를 trigger 信號로서 放電管을 통하여 放電시키므로서 發光시키는 것이 普通이다.

#### 나. 氣體 laser

氣體 laser 는 表 2와 같이 多種있으나 그 代表的인 He-Ne gas laser 를 例示하겠다. 이것은 Javan 等에 依하여 最初로 開發된 氣體 laser 로서 第 2種 衝突이란 特殊한 勵起法으로서 pumping 을 한다. 그림 5에 Ne-He 의 準位圖를 나타냈다. 氣體中에서의 放電에



(a) 螺線狀 Xe 管을 사용



(b) 直線狀 Xe 管 사용

그림 4. 固體 laser 構造圖

依하여 He 原子는 準安定狀態 2S 로 轉移한다. He 의 2S 狀態와 Ne 의 2S 狀態는 거의 같은 energy 準位에 있으므로 第 2 衝突에 依한 energy 의 transfer(轉移)가 可能하여 準安定狀態의 He 原子와 基狀態의 Ne 原子가 衝突하여 그 energy 를 Ne 에 주어 2S 狀態로 勵起한다. 2S 狀態의 壽命은 約 0.1  $\mu$ sec 모서 laser 의 terminal

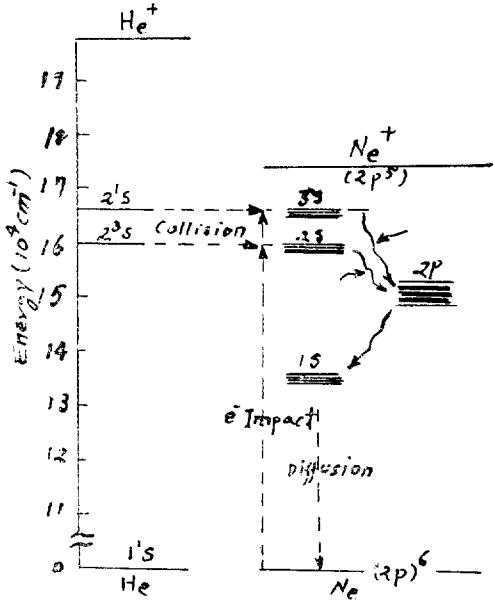
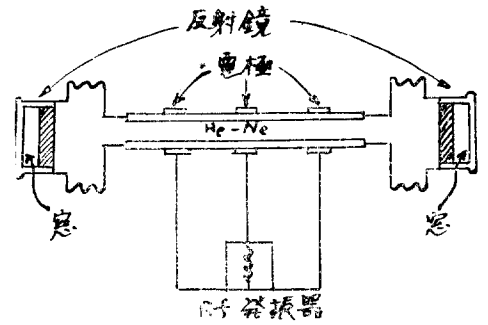
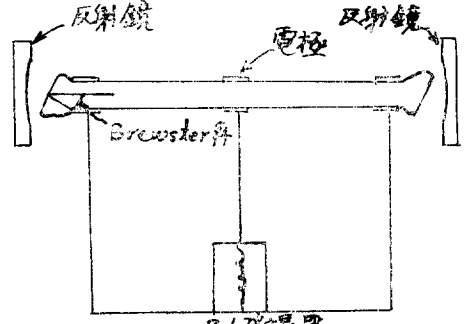


그림 5. Ne-He 의 energy 準位圖



(a) 内部 反射鏡型



(b) 外部 反射鏡型

그림 6. Gas laser 構造圖

(a) 内部 反射鏡型

(b) 外部 反射鏡型

狀態 2P 의 壽命( $\sim 0.01 \mu$ sec)보다 기쁘로 이 準位間에 反轉分布가 이루어져서 laser 發振이 이어나게 된다. 이때에 He 의 準安定狀態의 準位가 壽命이 길며 또한 Ne 의 勵起準位와 energy 가 비슷하다는 것이 重要하다.

Ne 의 2S 準位는 4 個, 2P 準位는 10 個의 微細構造를 가지고 있어 그 間에는 約 30 種의 轉移가 許容되나 現在까지는 그 中의 約 3 分之二에서 laser 發振이 觀測되었으며 波長이 1.526  $\mu$ 의 laser 光이 가장 강하다. 그리고 He 의 2S 에서 Ne 의 3S 에서 energy 轉送이 可能하며, Ne 의 3S  $\rightarrow$  2P 에 依한 可視光(0.6328  $\mu$ )의 laser 도 觀測되었다.

Laser 裝置는 1.0 mmHg 의 He 과 0.1 mmHg 의 Ne (He : Ne = 10 : 1)을 그림 5 와 같은 內徑 約 1 cm 길이 約 1 m 의 硝子管에 封入하고 高周波放電으로서 勵起하도록 되어 있다. 그림 6a 는 Javan 等에 依하여 最初로 開發된 氣體 laser 裝置이며 現在로서는 (b)와 같이 反射鏡이 外部에 있는 外部鏡型이 많이 쓰이고 있다. 外部鏡型에 있어서는 窓에 依한 反射損失을 없애기 爲하여 Brewster 角의 窓으로서 管의 兩端을 封하고 있다. 이와 같이 하면 偏光의 P 成分에 對해서는 거의 反射損



되어 없게 된다. gas laser의 경우에도 1m 當의 利得이 不過 數% 程度이므로 窓에 依한 反射損失이 조금이라도 있으면 發振하기 어려워진다.

다. 半導體 laser (injection laser)

固體 laser는 光勵起에 依한 螢光作用 即 photoluminescence 現像을 利用한 것으로서 光으로서 pumping 하여 laser 光을 얻었으나 半導體 laser에 있어서는 印加電界에 依한 發光作用 即 electro-luminescence 現像을 利用한 것으로 半導體의 P-N junction에 直接電流를 注入하여 勵起하므로써 laser 光을 얻는다. 따라서 이것을 semiconductor junction laser 또는 injection laser 라고 稱하는 것이 妥當할 것이다.

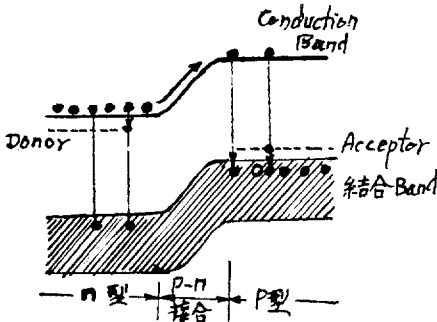


그림 7. P-N 接合에 있어서의 發光現像과 laser 作用

그림 7 과 같이 P-N 接合에 順方向電壓을 加하여 電流를 흘리면 p 및 n 領域에(各各 電子 및 正孔이 接合部를) 通하여 少數 carrier 로서 注入되어 多數 carrier 와 再結하므로써 發光하게 된다. 順方向電流를 增加해 주면 注入되는 carrier 數가 再結合에 依하여 消滅되는 數보다 많아져서 負溫度狀態를 이루게 되어 laser 動作을 하게 된다.

GaAs 半導體 laser 는 GaAs에 Zn 을 擴散하므로써 P-N 接合(junction)을 만든다.

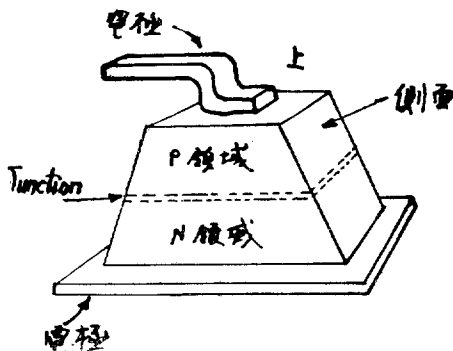


그림 8. 半導體 laser

그림 8 은 GaAs laser diode의 構造例이다. 接合面에 垂直인 二面을 平行으로 研磨하여 共振器를 形成한다. 이것을 液體窒素中에 담구어 두고 順方向의 電流를 約 8500 A/cm<sup>2</sup> 程度로 흘려 주면 laser 光이 發光하게 된다. laser 發光은 그 光의 干涉 pattern의 coherence에서 確認할 수 있다.

半導體 laser의 効率は 大端히 높아서 量子効率は 거의 1에 가깝다. 各種 laser의 發光効率을 比較해 보면 表 4와 같다.

表 4. 各種 laser의 發光効率

laser	材 料	發 光 効 率 (%)
固	體	~0.1 (%)
氣	體	~0.1 (%)
半	導 體	~10 (%)

4. Laser 光의 性質

本章에 있어서는 laser의 應用과 그의 展望에 對하여 論及하기에 앞서 laser의 基本的인 特徵을 簡單히 解說하였다.

가. 可干涉性(GaAs)

Laser의 成功에서 얻어진 가장 큰 收穫은 極히 高度의 coherence 性을 가진 光波의 實現이다. coherence의 性質은 空間的인 것(spatial coherence)과 時間的인 것(temporal coherence)의 두개의 本質的인 觀點에서 明示된다.

Spatial coherence는 어떤 時間 t에 있어서의 空間上의 二點  $\gamma$  및  $\gamma + \Delta\gamma$ 에 있어서의 各電界(또는 磁界)成分의 積의 時間平均 即

$$E_x(\gamma, t) E_x(\gamma + \Delta\gamma, t) \quad (19)$$

과 같은 相關函數로서 表示된다.

그림 9와 같이 波進行方向에 垂直인 波面에 따라  $\Delta\gamma$ 를 取하면, 그 面上의 任意의 2點에 있어서의 電磁界의 振幅은 서로 比例하며 1對1의 相關關係가 있다. 이와 같은 것은 完全한 coherence를 意味한다.

Temporal coherence는 空間의 1定한 位置  $\gamma$ 에 있어서 時間이  $\tau$ 만큼 다른 2개의 時刻에 있어서의 電界(또는 磁界)의 內積의 時間平均 即

$$E(\gamma, t) \cdot E(\gamma, t + \tau) \quad (20)$$

과 같은 相關函數로서 評價한다.

그림 11과 같이 位相이 連續的으로 變化하는 單一周期波數의 波는 어떠한  $\tau$ 에 對해서도 同一한 相關을 얻으므로 temporal coherence의 理想的인 例이다.

그러나 周波數帶域幅이  $\Delta f$  일 때는 (20)式的 絕對値는  $\tau$ 가 增加함에 따라 一般的으로 減少되는데 그것이  $1/e$

로 減少되는  $\tau$ 의 값  $\tau_c$ 를 coherence time 이라고 부른다.

從來의 光源으로 부터의 光波는 自然放出에 依한 것으로 coherence 性質이 極히 微弱한 incoherence 한 것이었으나 laser 光은 原理的으로 極히 良好한 空間的 및 時間的 coherence 를 갖추고 있다.

**나. 單色性(monochromaticity)**

이것은 spectral 이 單一周波數의 線 spectral 에 어느 程度 가까운가를 나타내는 것으로 時間的 coherence 와 直接關聯된 性質이다. Laser 光은 그 周波數가 energy 準位의 差로서 決定되는 만큼 極히 좋은 單色性을 가지나 發振할 때 自然放出에 依한 雜音(noise)를 一般的으로 除去할 수 없으므로 周波數變動을 이르게 發振 spectral 은 周波數分布를 나타낸다. 그 帶域幅  $\Delta f$ 는 發振出力을  $P$  라고 하면

$$\Delta f = m \frac{4\pi h f_L (\Delta f_L)^2}{P} \quad (21)$$

但  $m$ : 發振 mode 의 多重度  
 $f_L$ : laser 發振이 없을 때의 中心周波數  
 $\Delta f_L$ : 그 spectral 의 幅.

으로 주어진다.

氣體 laser 를 例로서  $f_L = 3 \times 10^{14}$  c/s

$\Delta f_L = 3 \times 10^8$  c/s,  $P = 10$  mW,  $m = 1$  일때  $\Delta f$ 는 約 25c/s 이며 數個의 發振 mode 일때도  $\Delta f$ 는 約 100 c/s 程度이다. 即  $\Delta f / \Delta f_L$ 은 約  $10^{-7} \sim 10^{-6}$  程度의 極히 尖銳한 單色性을 가진다. 이에 該當하는 coherence time  $\tau_c$ 는  $10^{-2}$  秒 程度로  $10^8$  km 程度의 光波의 길이에 對應한다.

**다. 指向性(directionality)**

物理光學에서 밝혀져 있는바 coherent 한 光束은 空間的으로 位相이 같으므로 回折에 依하여 若干 퍼질 뿐 一般的으로 極히 尖銳한 指向性을 가진다. 即 直徑  $D$  인 開口面을 통한 完全한 平面波의 波長을  $\lambda$  라고 하면 그 光束이 퍼지는 角度  $\Delta \theta$ 는

$$\Delta \theta = 2.44 \lambda / D \quad (22)$$

로서 주어진다.

波長  $1 \mu$ 의 laser 光을 直徑 50 cm 의 望遠鏡으로서 平行光線으로 만들면 그 指向性은 1 萬分之 3 程度가 되어 달 表面을 照射했을 때 直徑 約 1.9 km 의 面積이 照射될 程度이다. 따라서 laser 光을 radar 에 利用하면 이와 같은 高分解能을 얻을 수 있다는 것을 意味한다. 그리고 簡單한 光學系를 써서 相當한 長距離까지 電力을 傳達할 수 있다.

**라. Energy 密度 및 集中度**

直徑  $D$  인 “렌즈”를 一樣히 버치는 coherent 한 光은 焦點距離  $f$  만큼 떨어진 平面上에 同心圓狀의 回折圖形

(diffraction pattern)을 만든다. 이때의 焦點에 있어서의 中心強度  $I_0$ 는 光束의 energy 를  $p$  라고 하면

$$I_0 = \pi p / d^2 = \pi D^2 p / \lambda^2 f^2 \quad (23)$$

그리고 回折圖形의 中心部의 가장 輝度가 높은 部分의 直徑  $R_0$ 는

$$R_0 = 2 \left( \frac{3.83}{\pi} \right) d = 2.44 \frac{f}{D} \lambda = f \cdot \Delta \theta \quad (24)$$

이며 그 面積은

$$A_0 = 4.67 \left( \frac{f}{D} \right)^2 \lambda^2 \quad (25)$$

로서 算出된다.

例로서 連續發振을 하는 氣體 laser 의 경우  $1 \mu$  波長 laser 光을  $D/f = 1$  인 “렌즈”로서 集束했을 때 그 焦點中心部의 energy 密度는 約  $3 \times 10^{10}$  W/m<sup>2</sup> 가 되며 pulse 出力의 “루비” laser 의 경우 尖頭出力이 100 MW 以上인 것이 可能하므로 이때는 集束된 energy 密度는  $10^{21}$  W/m<sup>2</sup> 程度의 엄청난 값이 된다. 太陽表面의 energy 密度가  $10^8$  W/m<sup>2</sup> 임에 比하여 驚異의인 값임을 알 수 있다.

**마. 輝度溫度(brightness temperature)**

plank 의 輻射法則에 따르면 輻射溫度  $T$  와 平均輻射電力  $P_T$ 의 關係는

$$P = \frac{hf}{\exp(hf/kT) - 1} \quad (26)$$

로서 나타낸다. Laser 光의 경우 輝度溫度  $T_b$ 와 軸射電力과의 關係式은 近似的으로

$$T_b = P / k \Delta f \quad (27)$$

로서 주어진다. 例로서 氣體 laser 로서 出力  $P = 10$  mW,  $\Delta f = 100$  c/s 일때  $T_b = 10^{19}$  °K 란 驚異의인 값이 된다.

以上으로서 laser 光의 基本的性質을 原理的으로 나타내었다. 그런데 實在의 現 laser 光의 實例를 보면 表 5와 같다.

表 5. 各種 laser 光의 特性比較

特 性 \ laser 種類	氣 體 laser	固 體 laser	半 導 體 laser
發振帶域幅 $\Delta f$ (c/s)	$1 \sim 10^3$	$10^9 \sim 10^{11}$	$10^{11} \sim 10^{12}$
發振 mode 의 多重度 $m$	$1 \sim 10$	$10 \sim < 10^2$	$10 \sim 10^2$
指向性 $\Delta \theta$ (radian)	$\geq 10^{-3}$	$\geq 10^{-2}$	$10^{-1}$
發振出力 (PW)	連 續 的	$10^{-3} \sim 10^{-1}$	$10^{-3} \sim 1$
	Pulse 的 (尖頭出力)	$10^{-2}$	$10^3 \sim 10^5$ $10^6 \sim 10^9$ 巨대 Pulse
輝度溫度 $T_b$ (°K)	$10^{17} \sim 10^{22}$	$10^9 \sim 10^{15}$	$10^4 \sim 10^9$

## 5. Laser 의 應用

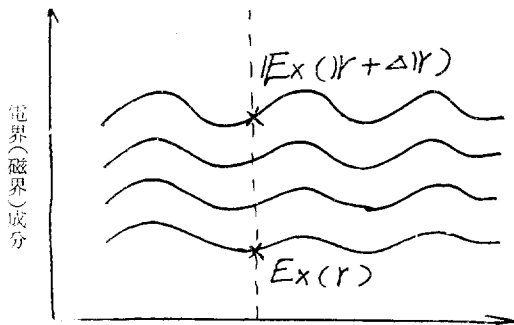
前章에서 述한 laser 의 性質은 從來의 어떠한 光源에서도 얻을 수 없는 極히 良好한 coherence(可干涉性)와 指向性을 가지고 따라서 極히 微少面積內에 集束시켜 從來의 어떠한 方法에서도 얻지 못한 微少面積內의 高 energy 密度를 얻을 수 있는 特異한 性質을 가지고 있다. 이와같은 特性을 利用한 그의 應用分野는 現在로서 試圖된 것만도 數 10 種에 達하여 더욱 더 多方面에의 應用 展望이 보인다. 本章에서는 그 代表的 應用面에 對하여 略述하겠다.

### 가. Coherent 光源으로서의 應用

#### 1) 通信에의 應用

Laser 光은 指向性이 極히 좋고 그 周波數도 크므로 適當한 方法으로서 그 周波數變調, 位相變調를 하면 超多重通信에 搬送波로서 쓸 수 있다. 루비 laser를 例로 들어 보면 그 周波數는  $4 \times 10^{14}$  c/s 이며 0.1%의 帶域幅을 써도 그 周波數幅은  $4 \times 10^5$  mc 이므로 6 mc 帶域幅의 television 을  $6 \times 10^4$  channel 以上 同時에 搬送할 수 있다.

周波數變調方式으로서는 磁場 또는 電場으로서 Energy 準位の 微少變位를 이르게 그 結果 發振周波數가 變調되는 方法이 試圖되었다. 前者인 磁場에 依한 方法을 Zeeman 效果變調方式, 電場에 依한 方式을 Stark 效果變調方式이라고 부른다. 이 외에도 電場에 依하여 光學的 性質(屈折率等)이 變化하는 物質을 利用한 變調方式이 있다. 이와 같은 方式으로서 位相變調, 振幅變調에 成功하고 있다. 그리고 超音波로 laser 棒을 振動시켜 共振器의 Q를 變化시켜서 變調하는 方式 등이 開發되어 있다. 한편 復調도 PIN photodiode 또는 microwave phototube 를 써서 beat 周波數의 檢出에 成功하고 있다. 그러나 이와 같은 方式은 光領域에 있어서의 變復調의 可能性을 나타냈을 따름이지 實用段階에는 아직도



波進行 方向

그림 9. 空間的 coherence

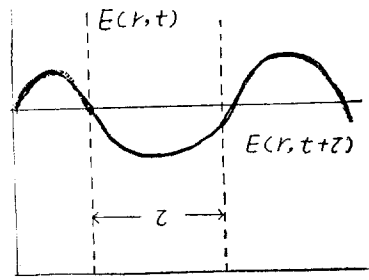


그림 10. 時間的 coherence

많은 難關이 있다. 그리고 laser 光의 良好한 指向性을 생각할 때 超遠距離通信에의 laser 光 利用은 極히 有望視되며 特히 宇宙通信에의 利用은 가장 有望視되고 있다. 그러나 laser 의 大氣中에서의 傳播損失, 散亂, 太陽光의 散亂 等에 依한 bak noise 等 考慮하여야 할 점도 많다.

#### 2) 其他應用

Laser 光의 良好한 指向性과 可干涉性(coherence)을 利用한 距離測定, 測地 等이 實用化되고 있다. 이 以外에도 可干涉性光源으로서 光學分野에의 應用은 許多하다.

### 나. 高 energy 密度源으로서의 應用

#### 1) 醫療에의 應用

前述한 바와 같이 原理的으로 laser 光은 波長程度의 크기로 收束할 수 있다. 따라서 1 W 程度의 出力도 그 收束된 焦點에 있어서는 約  $10^8$  W/cm<sup>2</sup> 의 超高 energy 密度를 나타낸다. 이와 같은 높은 energy 密度를 가진 laser 光을 試料面에 照射하면 加工面은 瞬間的으로 超高溫으로 加熱되어 材料는 表面으로 부터 蒸發되어 加工된다. 實在의 laser 는 多重 mode 의 發振이므로 波長程度까지 收束하는 것은 現段階에서는 困難하나 數  $10 \mu \sim$  數  $100 \mu$  程度로 收束되므로 微細한 구멍을 뚫는 다든가 溶接을 하는 加工에는 棼 方法이 追從할 수 없는 特點을 가지고 있다. 卽 micro-回路의 導線의 溶接, 薄膜의 加工, 醫療手術機로서 實用될 수 있다.

#### 2) 兵器로서의 應用

Laser 光이 가진 良好한 指向性과 그의 高 energy 密度를 考慮할 때 相當히 遠距離의 標의도 破壞할 수 있다. 더욱이 pulse 出力으로서 數 100 MW 의 laser 도 開發된 만큼 對空武器 對誘導彈兵器로서 實用될 可能性은 充分히 있다.

#### 3) 其他 應用

實用面으로서는 高速度寫眞의 照明光源, 干涉計用光源 等으로서 實用되게 되었으며 研究面에 있어서는 Raman 效果 波長이 다른 光을 同時에 吸收 또는 放出하는 多重量子轉移의 研究 等に 利用되고 있다.

(1964年 12月 3日 接受)