

# 未來를 開拓하는 魔術의 光線(레이저) II

— 氣體 · 固體 · 半導體의 各種 레이저 —

姜 衡 富  
〈漢陽大 工大 電氣工學科 教授〉

### 目 次

- 1. 緒 言
- 2. 氣體레이저
  - 2.1 He-Ne 레이저
  - 2.2 이온레이저
  - 2.3 炭酸가스(CO<sub>2</sub>) 레이저
  - 2.4 化學레이저
- 3. 固體레이저
  - 3.1 Q-스위칭(Q-Switching)
  - 3.2 YAG 레이저
  - 3.3 글라스레이저
- 4. 半導體레이저
  - 4.1 半導體루미네스스
  - 4.2 半導體의 에너지 構造
  - 4.3 擔體注入 半導體 레이저
  - 4.4 헤르메르 接合半導體 레이저

## 1. 緒 言

上位레이저 準位에 原子를 펌핑(Pumping)하는 方法에는 레이저의 種類에 따라 여러가지가 있다. 또 레이저는 原子와 分子의 内部에 蓄積된 微小한 能量을 集中的으로 뽑아내며 光線으로 變換시키는 裝置이므로 레이저光線의 性質은 原子, 分子의 分布의 均質性에 크게 左右된다. 레이저가 發振하고 있을 때 레이저内部에서의 溫度의 不均一도 레이저光線의 性質에 重要한 影響을 미친다.

레이저發振波長은 原子, 分子의 能量準位로 決定되므로, 一般적으로 波長은 固定되며 變化시킬 수 없다. 그러나 色素레이저는 相當히 넓은 範圍에 걸쳐서 波長을 變化시킬 수 있는 特徵을 갖고 있는 레이저이다.

레이저의 動作은 連續出力인 것과 펄스出力인 것으로 나누어진다. 連續出力은 實現하기 위해서는 레이저内部에서 發生하는 熱을 除去하고 또 충분히 펌핑을 해 주어야 한다. 펄스動作에서는 피크出力을 크게 할

수가 있다.

一般적으로 固體레이저는 密度가 높으며 따라서 레이저作用에 關與하는 原子, 分子의 數가 많으므로 高出力이 되며, 이에 比해 氣體레이저는 高出力을 얻기 보다는, 쉽게 發振하고 質의 높은 光線을 얻는데 適當하다.

本稿에서는 여러가지 代表的인 레이저를 例를 들어 레이저의 動作가 固有의 特性을 살펴 보기로 하겠다.

## 2. 氣體레이저

### 2.1 He-Ne 레이저

氣體레이저에서 제일 代表的인 것이 He-Ne레이저이다. 이것은 글라스細管內에 He와 Ne을 5對1의 比率로 混合하여 螢光燈과 같은 정도의 壓力(數 Torr)으로 封入한 것이다. He-Ne 레이저의 構造를 그림 1에 表示한다. 그림에서 글라스放電管에는 電極이 있으며 이에 直流 또는 交流電壓을 印加하여 放電시키면 連續發振이 일어나 波長 6328Å의 赤色레이저光線이 放射된다. 出力은 普通 1mW에서 100mW 정도이다. 이 레이저는 스위치만 넣으면 곧 動作하므로 매우 簡便하다.

He-Ne 레이저의 動作原理를 살펴 보자. Ne 原子가 붉은 光을 放出하는 主役을 맡으는데 He 原子가

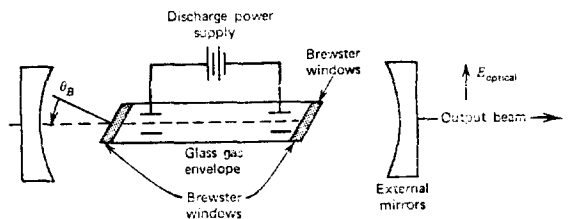


그림 1. He-Ne 레이저의 概略圖

Ne보다 훨씬 많이 封入되고 있으므로 放電에 의하여 생긴 電子는 주로 He原子와 衝突하여 多數의 He原子를 勵起시킨다. 勵起된 He原子는 Ne原子와 衝突하여 이에 에너지를 주어 自體는 에너지를 잃어서 基準狀態에 돌아간다. He-Ne레이저의 에너지準位를 그림 2에

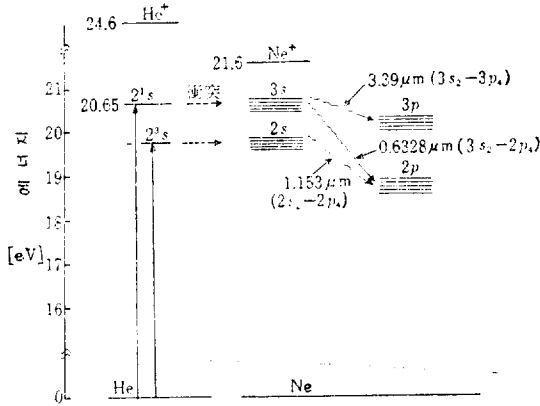


그림 2. He-Ne 레이저의 에너지準位

表示한다. 그림에서 He와 Ne의 勵起에너지準位는 거의 같은 레벨에 있으므로 펌핑은 매우 有效하게 이루어지며 Ne의 上位準位에 있는 勵起原子의 數는 점차 增加하여 결국 下位準位の 原子數보다 많게 되어 反轉 分布狀態가 이루어진다. He-Ne레이저는 그림에 있는 바와 같이 波長 06328, 1,153, 3.39 $\mu$ m이 세계의 波長에서 發振이 可能하며 希望하는 波長の 光을 얻기 위해서는 共振器의 反射鏡에 反射波長の 選擇性을 주고 共振器의 長이를 調整한다. 普通은 可視光인 0.6328 $\mu$ m을 利用한다. 또 그림 1에 있는 바와 같이 氣體레이저의 兩端은 大部分의 경우 傾斜斷面을 갖고 있으며, 이에 透明한 窓板이 붙여지고 있다. 이 窓을 Brewster 窓이라 하며 氣體레이저管의 内部에서 레이저光線이 玻璃窓을 通過할 때 電界벡터가 紙面內에 있는 直線 偏光의 光은 損失없이 透過한다. 따라서 레이저光은 圖示한 方向의 偏光을 갖는 直線偏光이 된다.

He-Ne 레이저는 제일 標準인 레이저光源으로서 科學研究와 計測分野에 널리 利用되고 있다.

2.2 이온레이저

He-Ne 레이저는 原子의 勵起狀態를 利用한 레이저인데 비해 이온레이저는 氣體를 이온화하여 이온의 에너지準位를 利用한 레이저이다. 이 레이저는 強力한 放電을 必要로 하므로 大電流로 動作시킨다. 原理의으로 그 構造는 He-Ne 레이저와 같다. 現在 여러가지의 이온레이저가 開發되고 있는데 實用的 見地로 봐서 Ar와 Kr에 의한 레이저가 重要하다. Ar이온레이저

는 出力이 매우 크며 강한 靑綠色의 光線과 紫外線을 發生한다. Ar이온레이저의 에너지準位와 可能한 9개의 레이저選移를 그림 3에 表示한다. 그 중에서도

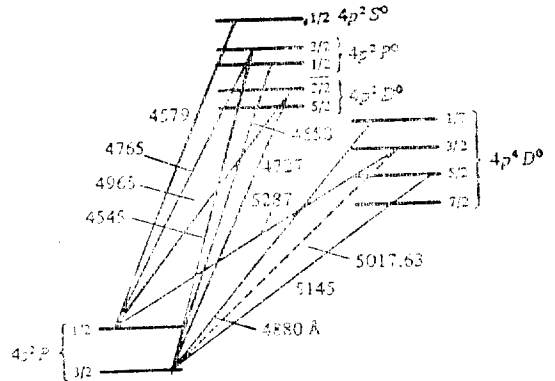


그림 3. Ar이온레이저의 에너지準位

0.4765, 0.4880, 0.5145 $\mu$ m의 波長의 出力이 크며 특히 0.4884 $\mu$ m의 出力이 크다. Kr이온레이저는 波長 0.6471 $\mu$ m의 赤色光을 強하게 放出한다.

이들 이온레이저는 連續的으로 10W以上の 大出力을 放射하므로써 取扱에는 충분한 注意가 必要하며 特히 눈에 대한 防護가 不可缺하다.

이온레이저는 그 構造上的 特徵으로서 放電管에 바 이패스를 設置해야 한다. 즉 이온레이저에서는 大電流가 흐르므로 이온이 陽極에서 陰極에 流入하여 氣體壓力이 陰極側에서는 上昇하고 陽極에서는 低下한다. 이로 인하여 放電이 不安全하게 되므로 陽極과 陰極의 部分에 파이프를 連結시켜 壓力이 均等化되도록 한다. Ar레이저는 He-Ne레이저에 比한 電源 및 기타 裝置가 相當히 크게 되므로 그 價格도 相當히 비싸지만, 그 出力이 매우 크고 波長領域이 可視光中에서도 短波長側에 있기 때문에 光化學作用이 세며 科學用레이저로서는 獨特한 地步를 구축하고 있다.

2.3 炭酸가스(CO<sub>2</sub>)레이저

炭酸가스레이저는 炭酸가스分子(CO<sub>2</sub>)의 振動에너지를 利用하는 레이저이며, 1964年初에 提案되었다. 처음에는 炭酸가스만을 使用하였기 때문에 그렇게 큰 出力을 얻을 수가 없었지만 그 後 窒素가스와 He가스를 適當量 混合하므로써 特出한 大出力을 얻을 수 있게 되었다.

이 레이저의 發振은 매우 強하며 出力은 數KW以上, 效率도 10~20%以上이 된다. 表 1은 이미 말한 He-Ne 레이저, Ar이온레이저의 特性과 比較한 것인데 炭酸가스레이저의 出力, 效率이 압도적으로 크다는 것

表 1. 氣體레이저의 特性의 比較

레이저	길이당레이저 출력[W/m]	最大出力[W]	効率[%]
He-Ne 레이저	0.1	1	0.1
Ar 레이저	1.1	50	0.1
CO <sub>2</sub> 레이저	60~80	1200	15~20

을 알 수가 있다. 다만 炭酸가스레이저는 波長이 10.6  $\mu\text{m}$ 이며 赤外線領域에 있으므로 눈으로는 볼 수가 없다. 이 波長은 大氣中の 吸收가 제일 적은 波長이므로

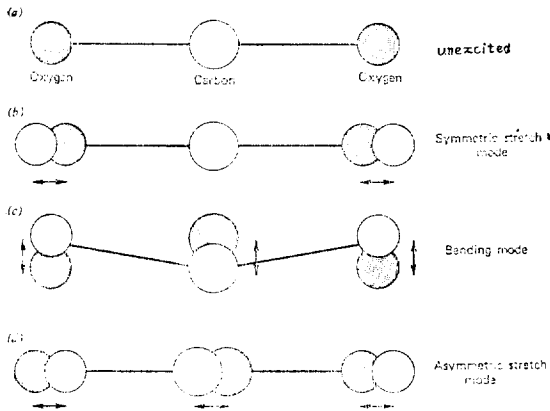


그림 4. CO<sub>2</sub> 레이저의 振動모오드

“大氣의 窓”이라 불리우는 領域에 相當한다.

여기서 炭酸가스레이저의 發振原理를 조금 자세히 살펴 보자. 그림 4(a)에 있는 바와 같이 炭酸가스分子는 炭素原子 C를 中心으로 하여 二個의 酸素原子 O가 左右對稱으로 結合되고 있다. 이 分子에 放電등에 의하여 생긴 電子가 衝突하여 에너지를 주면 振動이 일어난다. 이 振動에는 3개의 모오드(mode)가 있다. 그 하나는 그림 4(b)에 있는 바와 같이 2個의 酸素分子가 炭素分子를 中心으로 하여 左右對稱의 伸縮하는 伸縮과 같은 對稱振動모오드이다. 두번째는 그림 4(c)와 같이 分子가 原子核間軸에 垂直인 方向에 對稱의 振動하는 屈曲(bending) 振動모오드이다. 셋째는 그림 4(d)와 같이 原子가 原子核間軸에 따라서 非對稱의 振動하는 非對稱伸縮모오드이다. 量子力學의 理論에 의하면 이들 振動모오드는 非連續的인 固有한 에너지準位를 갖고 있다. 이 分子振動의 모오드를 세자리의 數로 表示한다. 100單位數字는 對稱모오드를 10單位數字는 屈曲모오드를, 1單位數字는 非對稱모오드를 意味한다. 그림 5에 炭酸가스分子와 N<sub>2</sub>分子의 振動에너지準位를 나타낸다. 그림에서 (100), (200)이란 것은 對稱모오드이며 同一모오드에서는 큰 數字일수록 높은 에너지準位를 意味한다. (010)와 (020)는 屈曲모오드, (001)은 非對稱모오드이다.

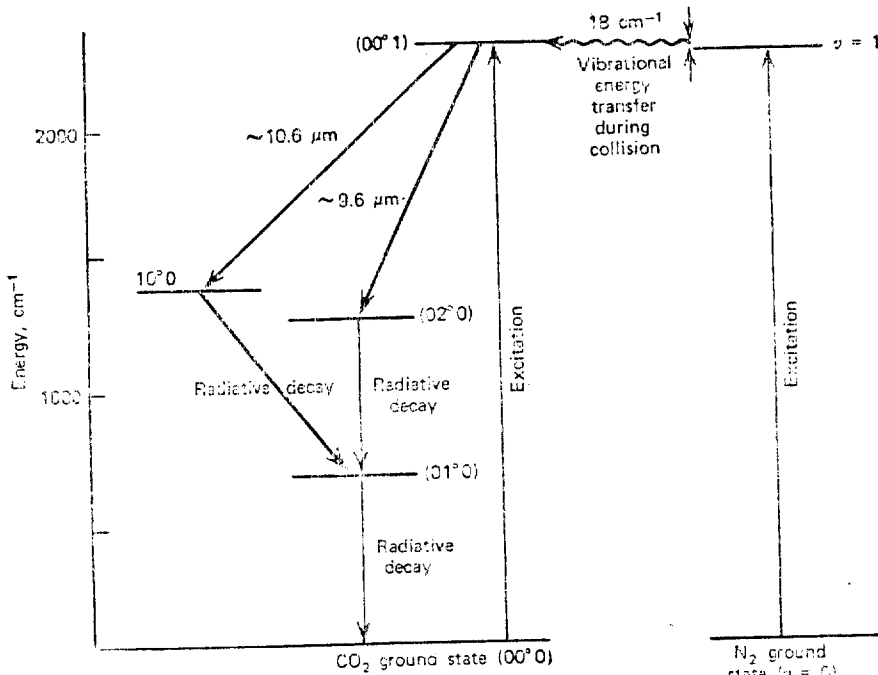


그림 5. CO<sub>2</sub> N<sub>2</sub>의 에너지 準位

窒素分子(N<sub>2</sub>)는 N—N의 결합을 하고 있으며 對稱振動을 한다. N<sub>2</sub>개스中에서 放電시키면 그림 4의 準位 1에 勵起되는데 이 準位の 壽命은 매우 길므로 이 準位에 勵起된 窒素分子는 다른 分子와 衝突하지 않은 한 그대로 그 準位에 머물게 된다.

따라서 炭酸개스와 窒素개스의 混合氣體中에서 放電시키면 그림 5에서 窒素개스가 基底狀態 v=0에서 勵起準位 v=1로 勵起된다. 이 勵起窒素개스는 炭酸개스와 衝突하여 自身은 에너지를 잃어서 基底準位 0에 되돌아가며 反對로 炭酸개스分子는 에너지를 얻어 (001) 準位에 勵起된다. 이 때 炭酸개스分子의 非對稱모오드 (001)와 窒素分子의 對稱모오드의 準位 1과는 에너지 準位는 그림 5에 있는 바와 같이 매우 가까우며 그 差는 0.002eV로 매우 작다. 이 때문에 勵起窒素分子는 충돌을 媒介로 하여 容易하게 炭酸개스分子를 (001) 準位에 勵起시킬 수가 있다. 이리하여 放電에너지는 窒素分子를 介在하여 炭酸개스에 주어지며 (001) 準位에 있는 炭酸개스分子의 數가 그 아래에 있는 對稱모오드準位에 있는 分子數보다 많게 되어 反轉分布가 實現하게 된다. 그 結果 그림 5와 같이 (001) 準位에서 (100)準位에 遷移가 일어나, 10.6μm의 波長을 갖는 光이 發射된다. (100)準位에 떨어지 分子는 곳 아래에 있는 (010)準位에 遷移하여 基底狀態(000)에 되돌아간다.

炭酸개스레이저처럼 여러가지 많은 타입(Type)이 提案되고 있는 레이저도 드물다. 普通타입(Type)의 炭酸개스레이저는 길이 1m, 直徑 2cm 정도의 放電管內에 He개스 80%, 窒素개스 15%, 炭酸개스 5%의 混合개스를 數 Torr의 壓力으로 封入하여, 陽極, 陰極間에서 放電시켜 이것을 光共振器內에 配置한 것이다. 이 경우에 放電管周圍에 冷却水를 흘려 개스의 溫度를 내리면 出力은 數倍정도 增加한다.

出力을 增加하기 위해서는 개스의 壓力을 높여야 한다. 그러나 개스壓이 一氣壓以上이 되면 放電이 困難하게 된다. 따라서 高氣壓炭酸개스레이저에서는 이 放電을 容易하기 위해서 電子를 發生시키는 作用과 이 電子를 利用하여 개스分子를 勵起하는 作用을 별도로 하는 方法이 採用되고 있다. 이 方法을 利用한 것으로 TEA레이저와 電子비임 CO<sub>2</sub> 레이저가 있다.

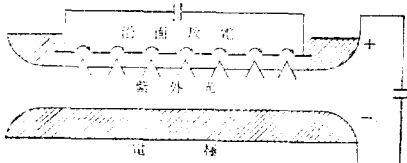


그림 6. TEA CO<sub>2</sub> 레이저의 概念圖

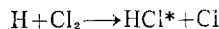
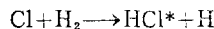
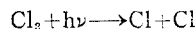
그림 6는 TEA CO<sub>2</sub> 레이저의 構造의 概略圖이다. TEA는 Transverse Excitation Atmospheric Laser의 略이며, 橫方向勵起大氣壓레이저를 意味한다. 그림 6에서 아는 바와 같이 大氣壓以上の 炭酸개스混合氣體에 橫方向으로 沿面放電을 일으켜 發生한 紫外線이 개스를 光電離하여 電子를 發生시킨다. 이 電子에 별도로 電壓을 加하여 電極間을 走行시키므로서 氣體分子와의 衝突을 일으켜 勵起가 일어나도록 한다. 이러한 레이저는 構造上 펄스의인 레이저光線을 發生하며, 簡單한 裝置로서 出力에너지 數 J, 펄스幅 100nsec, 出力파워 10MW의 레이저光을 얻을 수 있다.

炭酸개스레이저는 에너지應用分野에서 그 中心이 되는 重要한 레이저이며, 加工, 醫療, 그 外에 核融合研究에도 利用되고 있다.

### 2.4 化學레이저

化學反應의 에너지를 펌핑에 利用하는 레이저이다. 勵起用으로 큰 電源을 必要로 하지 않고 大出力이 얻어지므로 特殊한 用途에 適當하다. 例를들면 人工衛星이라든지 航空機에서의 利用이 생각된다.

二種類의 氣體로 化學反應을 일으키면 그 過程에서 中間生成物로서 勵起分子가 生成되는데, 이 때 反轉分布가 實現되면 레이저發振이 일어난다. 例를 들면 鹽素(Cl<sub>2</sub>)와 水素(H<sub>2</sub>)의 混合개스에 트리거(Trigger)의으로 短時間 光線을 照射하면 다음과 같은 化學反應이 連鎖的으로 進行하며 이 때 中間成分인 鹽化水素分子 HCl\*는 振動回轉準位の 勵起狀態에 있으며 波長 3.8 μm의 赤外領域에서 發振한다.



또 水素와 弗素(F<sub>2</sub>)와의 化學反應으로도 強力한 레이저作用을 얻을 수 있다. 이 레이저는 化學研究外에 軍用레이저로서도 큰 關心을 받고 있다.

### 3. 固體레이저

固體레이저는 루비, YAG(이트리움알루미늄가넷)와 같은 結晶과 그라스와 같은 非晶質을 母體로 하여 그 속의 螢光을 發生하는 活性이온을 付加하여 레이저作用을 갖도록 한 것이다. 固體레이저의 特徵으로서는 活性이온의 濃度を 크게 할 수 있으므로 發振出力이 크며, 또한 機械的으로 強하여 부서지지 않는다는 등을 들 수가 있다. 固體레이저에서는 普通 光에너지에 의하여 펌핑한다. 또 固體레이저는 連續發振과 펄스發

振으로 區分할 수가 있다. 連續發振을 하기 위해서는 레이저 素子の 冷却을 容易하게 할 수 있어야 하며 따라서 熱傳導性이 좋은 結晶素子가 많이 使用된다. 펄스發振에서는 매우 큰 出力을 얻을 수가 있다.

3.1 Q-스위칭(Q-Switching)

光펌핑의 方法으로 反轉分布를 만들어 레이저를 發振시킬 때, 펄핑이 매우 강한 경우에는 連續의 發振을 繼續시킬 수 있으나 大部分의 경우는 다음에 說明하는 緩和發振이 된다. 즉 펄핑으로 인하여 충분한 反轉分布가 이루어지면 發振이 시작하며 그 때문에 反轉分布가 減少하여 發振이 끝나나 펄핑은 繼續하고 있으므로 反轉分布는 回復하여 다시 發振하는 經過를 되풀이 한다. 發振光의 波形은 그림 7과 같은 스파이크

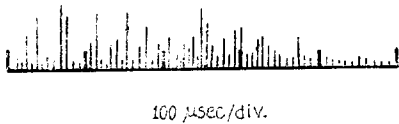


그림 7. 緩和發振

(spike) 모양의 放射가 繼續한다. 이 緩和發振으로서 큰 펄스出力을 얻을 수가 없다. 따라서 레이저素子가 펄핑되고 있는 사이에 光共振器의 反射鏡을 無反射 狀態로 하여 그 機能을 停止, 換言하면 共振器의 波長 選擇性이 良好度 즉 Q值를 낮추어 發振할 수 없는 狀態로 維持하여, 反轉分布가 충분히 크게 된 狀態에서 急激히 Q值를 높혀 急激한 發振이 일어나도록 하는 方法으로 그림 8과 같은 單一巨大펄스를 發生시킬 수 있다. 이 技術을 Q-switching이라 한다.

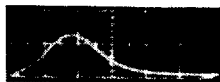


그림 8. Q-Switching 波形

Q-스위칭에는 여러가지 方法이 있으나, 여기서는 Pockel 效果를 利用한 電氣光學的 셔터(Shutter)法에 대하여 說明한다.

Pockel 效果란 第二磷酸카리 (KDP)와 같은 電氣光學結晶에 電壓을 印加하면, 이 結晶을 通過하는 光線의 偏光面이 電壓에 比例하여 回轉하는 效果를 말한다. 그림 9에 KDP Pockel's cell를 利用한 Q-Switching 法을 表示한다. 그림에 있는 바와 같이 光共振器를 構成하는 2장의 反射鏡사이에 레이저素子, 偏光子, Pockel's cell를 配置한다. 偏光子에는 普通 니콜프리즘을

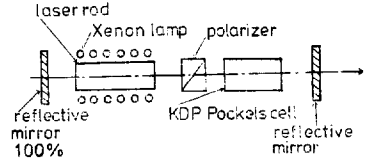


그림 9. KDP를 利用한 Q-Switching法

使用하는데 이를 通過한 光線은 振動方向 즉 偏光面이 規制되어 그림에서 進行方向에 垂直인 方向에 偏光하게 된다. 이 偏光된 레이저光線이 Pockel's cell를 通過한 後 오른쪽의 反射鏡에서 反射하여 또 다시 Pockel's cell를 通過할 때 偏光方向이 90°回轉하여 紙面에 垂直方向에 偏光하도록 Pockel's cell에 適當한 電壓을 印加하면, 光線은 偏光子를 通過할 수 없게 된다 즉 셔터가 닫힌 狀態가 되고 있다. 이 狀態에서 펄핑을 충분히 하여 反轉分布가 最大值에 達하는 瞬間 Pockel's cell 電壓을 0으로 하면 셔터가 열려 急激히 레이저發振이 일어나 巨大한 單一펄스가 放射된다.

Q-스위칭은 제일 重要한 레이저技術의 하나이며, 固體레이저에서는 거의 大部分이 Q-스위칭을 利用하여 高出力펄스를 얻고 있다.

3.2 YAG레이저

固體레이저로서 맨 먼저 發振한 것은 루비레이저이지만 現在 實用에 제일 널리 利用되고 있는 것은 YAG 레이저이다. 이 레이저는 가넷트( $Y_3Al_5O_{12}$ ) 結晶內에 動作이온으로서 네오디뮴( $Nd^{3+}$ )을 溶解시킨 것으로 出力이 매우 크며 效率이 높은 점이 特徵이다. 펄핑에는 沃素램프를 使用하며, 直徑 3mm, 길이 3cm 정도의 작은 素子로서 1~2W의 連續出力이 얻어진다. 發振波長은 1.06μm로 赤外線領域에 있다. 그림 10는 YAG

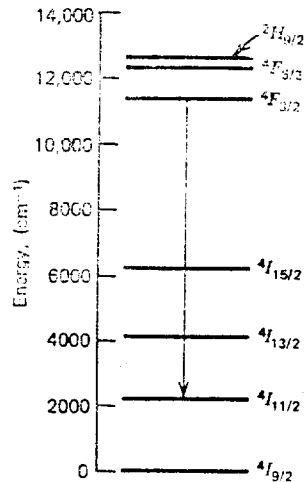


그림 10. YAG 레이저의 에너지 準位

結晶内の Nd<sup>3+</sup>이 에너지準位이며 準位 'F<sub>3/2</sub>'라 'I<sub>11/2</sub>' 사이에서 레이저作用이 일어난다.

### 3.3 글라스레이저

結晶을 母體로 하는 레이저는 大型化가 어렵다. 이에 대해 글라스는 母體로 하여 그 속에 네오디뮴을 溶解하는 글라스레이저는 光學的 均質性이 優秀하며 大型레이저素子도 쉽게 만들 수 있으므로 大出力펄스레이저로서 最適하다. 特히 그림 11에 있는 바와 같이 發振器에 增幅器를 連結 시킴으로써 現在 出力이 數 KJ, 1TW(10<sup>12</sup>W)인 巨大한 펄스出力이 얻어지고있다

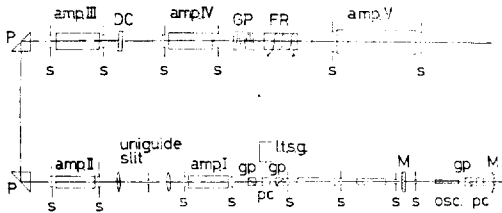


그림 11. 大出力글라스레이저(發振器에增幅器를 連結)

이 레이저는 核融合研究에서 에너지드라이버(Energy Driver)로서 널리 利用되고 있다.

## 4. 半導體레이저

지금까지 叙述한 레이저에서는 原子와 이온 또는 分子가 서로 獨立의으로 作用하여 外部에서 pumping을 받으면 그 에너지에 相當한 勵起準位에 個個의 原子分子, 이온들이 勵起되어 誘導放出에 의하여 發生하는 레이저이다. 이에 대해 半導體結晶은 規則整列하게 配置되어 있는 같은 種類의 同一原子로 構成되고 있으며, 그 性質은 砒와 같은 孤立한 이온의 性質이나 또는 氣體原子의 性質과는 相當히 다른 特性을 지니고 있다.

### 4.1 半導體루미네스스

硫化亞鉛 ZnS, 硫化카드뮴 CdS등의 半導體에 光 또는 電界를 加할 경우 發光하는 現象은 이미 잘 알려진 事實이며, 이 現象을 루미네스스(Luminescence)라 한다. 이 發光機構는 半導體의 밴드(Band) 構造에 關係가 있다. 半導體는 그림 12에 있는 바와 같이 禁止

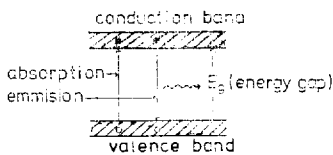


그림 12. 眞性半導體의 band 構造

帶를 사이에 두고 價電子帶와 傳導帶가 相對하고 있다 이것이 光 또는 電界에너지를 주면 價電子帶의 電子가 勵起되어 傳導帶에 오르며, 價電子帶에는 홀(Hole)이 생긴다. 이 價電子帶의 電子가 어느 時間을 經過하면 傳導帶에서 價電子帶에 떨어져 홀과 再結合하면서 光線을 放出하게 된다. 그러나 이 時點에서는 自然放出 단이 일어나며 따라서 螢光만을 放出한다. 그런데 後述하는 바와 같이 電子密度가 過密하게 되면 電子가 傳導帶의 下端에 모이게 되어, 價電子帶의 홀과의 距離도 가깝게 되므로 再結合이 活發히 일어나게 된다. 再結合에 의하여 생기는 光에 자극되어 다음의 再結合을 잇달아 促進하게 되어 誘導放出을 일으키게 된다. 그러나 實際로는 單一結晶으로는 有効한 誘導放出을 일으키는 것이 매우 어렵기 때문에 後述하는 接合半導體를 利用해야 한다.

### 4.2 半導體의 에너지構造

그림 13에 不能物의 없는 GaAs의 밴드 構造를 나타낸다. 結晶面의 (100)方向(橫軸)에 電子의 運動量을 나타내는 波動벡터K를 또 運動에너지E를 縱軸에 잡

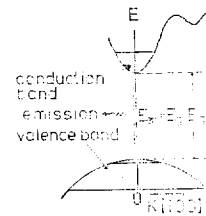


그림 13. GaAs의 에너지帶構造와 電子의 遷移(直接遷移)

으면, 그림에 있는 바와 같이 傳導帶의 밑바닥과 價電子帶의 꼭대기는 서로 같은 K의 位置에 있으므로 電子가 傳導帶로 부터 價電子帶에 直接的으로 遷移할 수 있다. 放射에너지 E<sub>em</sub>은 禁止帶의 幅E<sub>g</sub>와 거의 같다. 이러한 에너지構造를 갖는 半導體에는 GaAs의 GaSb, InP, InAs, InSb등이 있다. 이들은 모두 pn接合을 만들어 順方向에 電流를 注入하면, 誘導放出에 의한 發生 즉 레이저光을 얻을 수가 있다.

이에 대하여 純粹한 Si와 같은 半導體의 에너지構造는 그림 14에 있는 바와 같이 GaAs의 경우와는 相當히 다르다. 이 경우에는 傳導帶의 밑바닥과 價電子帶의 꼭대기는 同一한 K의 位置에 없다. 따라서 傳導帶의 電子가 價電子帶에 遷移하기 위해서는 그림에 있는 바와 같이 레이저放射에 의하여 에너지E<sub>em</sub>를 잃고 同

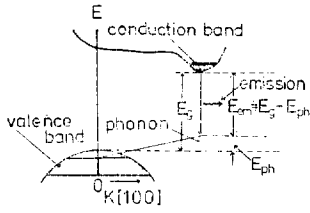


그림 14. Si의 에너지帶構造와 電子의 遷移(間接遷移)

때에 포논(Phonon)을 放射하여 에너지  $E_{ph}$ 를 잃어서 價電子帶에 떨어진다. 이 경우의 遷移는 GaAs과는 달리 間接的으로 일어난다. 前者를 直接遷移, 後者를 間接遷移라 한다. 間接遷移는 直接遷移에 비해 高次的 過程이므로 遷移가 일어나는 確率은 작으며 따라서 레이저 作用에는 매우 不利하다.

4.3 擔體注入半導體레이저

半導體레이저를 얻기 위해서는 傳導帶의 電子密度와 價電子帶의 홀密度를 크게할 必要가 있다. 그렇게 하기 위해서는 單體의 GaAs 보다는 GaAs의 pn다이오드를 使用하여 順方向에 큰 電流를 흐르게 한다. n형 및 p형半導體의 에너지準位는 그림 15 (a), (b)와 같으며, 이 두가지 半導體를 接合한 경우의 에너지準位圖를 그림 16 (a), (b)에 表示한다. 다만, 그림 16 (a)는 바이어스電壓을 加하지 않은 熱平衡狀態이며, 그림 16

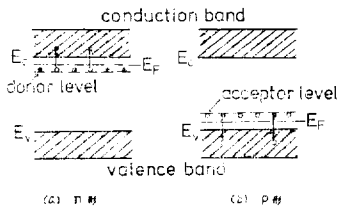
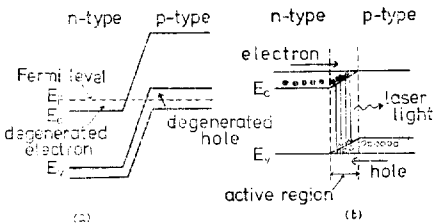


그림 15. n형 및 p형半導體의 에너지準位圖



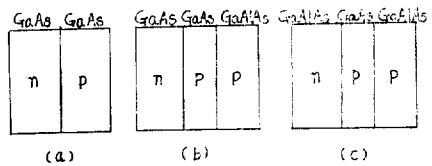
(a) bias 電壓을 印加하지 않을 때  
(b) 順方向 bias 電壓을 印加할 때

그림 16. pn 接合의 에너지準位圖

(b)는 順方向에 바이어스電壓을 충분히 加한 경우이다 이 半導體는 電流를 增大시키기 위해서 더너(Donor)不純物과 악세프터(Acceptor) 不純物을 보통보다 많이 注入하고 있다. 이 때문에 n形側의 傳導帶의 電子 및 p形側의 價電子帶의 홀은 縮退狀態에 있으며 그림 16 (a)에 있는 바와 같이 Fermi準位는 n形에 있어서는 傳導帶에 들어가고 있으며 p形에서는 價電子帶에 들어가고 있다. 이 狀態에서 順方向電流펄스를 흐르게 하면 n形傳導帶에서 p形傳導帶에 多數의 電子가 注入되어 活性領域에서는 電子가 擴散長程度의 작은 領域에 存在하게 되며, 電子의 分布는 反轉分布狀態가 된다. 따라서 電子는 容易하게 價電子帶에 떨어져 홀과 再結合하며 이 때 發生하는 光은 接合面의 活性領域으로부터 放射된다. 이 때 半導體의 兩端面이 Fabry-Perot 形 共振器의 動作하여 coheren한 發生이 可能하게 된다. 이 方法은 擔體(Carrier)를 注入하므로 注入形레이저(Injection Laser)라 한다.

4.4 헤테로接合(Heterojunction)半導體레이저

半導體레이저에는 同一半導體의 n형, p형을 接合한 것과 異種半導體의 n형, p형을 接合한 것이 있다. 前者를 호모接合(Homojunction), 後者를 헤테로接合(Heterojunction)이라 한다. 또 헤테로接合에는 單一헤테로接合과 二重헤테로接合이 있다. 이들 各種레이저의 發振電流의 閾值를 보면 호모接合에서는  $40000[A/cm^2]$ , 單一헤테로接合에서는  $8000[A/cm^2]$ 로 減少되며, 二重헤테로接合에서는  $1000[A/cm^2]$ 까지 減少되어 效率이 매우 좋게 된다. 各接合의 概念을 그림 17에 表示한다. 그림 (a)는 GaAs의 n형 p형을 接合한 호모



(a) 호모接合 (b) 單一헤테로接合 (c) 二重헤테로接合

그림 17. 호모接合 및 헤테로接合半導體레이저

接合, (b)는 npp接合中の pp接合이 異種半導體 GaAs 과 GaAlAs으로 된 單一헤테로接合, (c)는 npp接合中の np接合部와 pp接合部의 양쪽이 異種半導體로 된 二重헤테로接合이다. 여기서는 二重헤테로接合에 대하여서만 說明하기로 하겠다.

그림 18은 二重헤테로接合半導體레이저의 動作說明圖이다. 그림 (a)는 ①의 n형의 GaAs 基板의 表面에

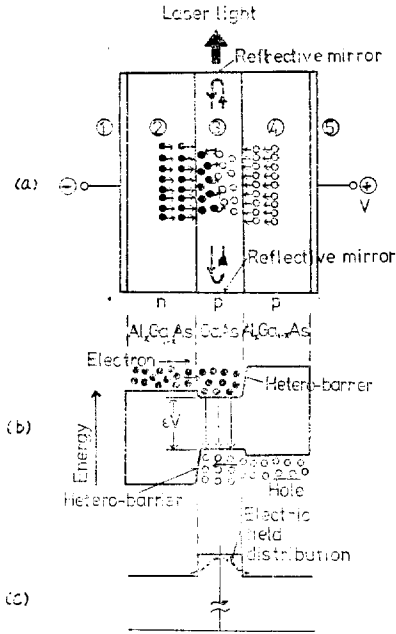


그림 18. 二重헤테로 半導體레이저의 構造(a), 에너지帶(b), 屈折率分布(c)

②의 n형의  $Ga_{1-x}Al_xAs$ 層, ③의 p형의  $GaAs$ 層, ④의 p형의  $Ga_{1-x}Al_xAs$ 層, ⑤의 p형의  $GaAs$ 層을 順序로 結晶成長시킨  $Ga_{1-x}Al_xAs-GaAs$ 基板으로부터 잘라낸 素子の 兩端을 劈開한 것으로, 兩端은 平行한 反射鏡面으로 되고 있다. ③의  $GaAs$ 層이 레이저發振을 일으키는 活性層이며, ①, ⑤는 電極을 附着시키기 위한 層인데 ⑤ 즉 p側에  $\oplus$ , ① 즉 n側에  $\ominus$ 의 電壓을 加하여 順方向으로 電流를 흐르게 한다. 그림 (b)는 活性層 ③의  $GaAs$ 의 帶間에너지差에 相當하는 電壓을 加할 때의 에너지 構造이며, 헤테로접合部에 0.4eV 정도 的 헤테로障壁이 생겨, 順方向의 電流에 의하여 注入된 電子 및 홀이 이 헤테로障壁 때문에 活性層에 密閉되므로 헤테로障壁이 없을 경우에 비해 훨씬 작은

電流로 높은 레이저利得을 얻을 수가 있다. 이때 ③層을 둘러싸고 있는  $Ga_{1-x}Al_xAs$ 의 ②, ④層의 屈折率은 ③層의 屈折率보다 數%작다. 普通은 組成比  $x=0.35\sim 0.5$ 이며, 그 屈折率差는 5~10%程度가 되므로 活性層을 core로 하는 誘電體導波路가 되며 그림 (c)에 있는 바와 같이 發振하는 光波는 活性層內에 잘 密閉된다. 이와 같이 二重헤테로 構造로 하면 電子와 홀의 擔體와 光波의 二重의 密閉效果가 크므로 레이저의 動作電流密度를 낮출 수 있으며 또 發光效率를 높일 수가 있으므로 많은 半導體레이저에는 이 構造가 多用되고 있다. 現在 連續으로 1萬時間以上의 壽命을 갖는 것이 出現하고 있다.

半導體레이저에서 제일 代表的인 것은  $GaAs$ 레이저이지만 기타 類似한 것도 많다. 發振에는 펄스發振과 連續發振의 두가지 方法이 있다. 表 2에 主要한 半導體레이저를 表示한다.

表 2. 여러가지 半導體레이저

材 料	發振波長 ( $\mu m$ )	溫 度 ( $K^\circ$ )	動 作	勵 起 法
CdS	0.5	77	펄 스	光, 電子線
GaAs	0.84~0.85	77	連 續	電流, 電子線, 光
	0.9	300		
$GaAs_{1-x}P_x$	0.71	77	펄 스	電流, 電子線
	0.62~0.84(組成 $x$ 를變化시키므로서發振可能)			
InP	0.927	77	連 續	電 流
	0.902	20		
InSb	5.2	1.7	連 續	電流, 電子線, 光
InAs	3.1	4.2	連 續	電流, 電子線, 光
PbTe	6.5	12	連 續	電流, 電子線
$\alpha SiC$	0.485	300	連 續	電流

이 半導體레이저는 레이저光通信용으로 利用되기 시작했으며 optical fiber와 함께 高性能化研究가 活潑히 展開되고 있다.