技術解說
14—4—4

氣體 Laser의 勵振 Mechanism

金 暎 權*

序 言

1955年에 Gordon과 몇명이 24 GC/sec의 周波數에서 처음으로 maser 動作을 시킨 以來 原子와 分子 過程을 利用한 增幅과 發振의 技術이 더 높은 周波數에 까지 擴張되어 왔다. Schawlow와 Townes는 maser의 原理를 赤外線과 光 周波數까지 擴大하는 理論的인 可能性을 생각해 냈으며 첫번째의 Ruby laser에 對한 發表가 있은 以後 數種의 固體 및 gas media에서 여러 種類의 波長의 光 增幅이 可能하게 되었다. 여기서는 氣體 laser의 數種에 對한 energy 勵振 狀態와 勵振 mechanism에 關하여 重要한 部分만 要約해서 소개하려고 한다.

氣體 laser는 Javan, Bennett, 및 Herrott에 依하여 처음으로 He-Ne 放電 光發振을 한 以來 約 4年이란 짧은 동안에 여러 다른 種類의 氣體들을 光 動作(optical action)으로 찾아 냈으며 波長의 範圍는 6,328Å 부터 280,000Å 까지를 點하고 있다. 全 波長의 數는 220 以上에 달하는 發振이 15種 以上의 氣體로 可能하게 됐다. 勿論 laser는 氣體 以外에 Ruby와 같은 固體와 GaAs 같은 半導體 接合等 여러가지가 laser material로 開發되여 있으며 이들도 역시 많은 種類의 波長을 넓은 範圍에 걸쳐 發振, 增幅하고 있다. 즉 그 實例를 들면 15가지의 crystal과 13가지의 dopping material이 6×10^{-5}cm인 赤色에서 7×10^{-4}cm인 赤外線까지 걸쳐 40種의 波長을 내고, 6種以上의 半導體와 유리의 數種(型)(crown, 6 flint, 外)에 plastics과 液體等의 數種을 포함하여 laser 作用을 하는 것을 알아냈다. 筆者가 硏究하고 있는 延世大 博士課程 硏究室에서는 Ruby laser를 組立中에 있으며 역시 He-Ne laser를 준비中에 있다. 그러나 최종적으로는 半導體 P-N 接合인 GaAs diode laser를 硏究할 計劃에 있다. 이 계획들은 추에 차츰 소개하기로 하겠으며 이번에는 우선 여러가지 種類의 氣體 laser에 對한 勵振 mechanism을 세가지 즉 (1) 原子系統의 경우 準安定 遷移 (2) 分離 勵振 遷移 (3) 電子 充滿 勵振 으로 分類하여 그에 해당되는 laser 氣體 種類를 대개 說明할 것이다.

좀더 仔細한 것은 끝에 소개하는 參考文獻을 보면 알 수 있으며 그 以外에도 engrgy 準位와 energy 狀態에 對하여 電子的 量子論이나 原子物理 系統의 參考文獻을 보면 좋을 것으로 안다.

*延世 理工大 電氣工學科·講師

1. 原子 系統의 경우 準安定 傳達

이경우의 가장 적당한 氣體 laser는 He-Ne 混合 laser이다. 그림 1은 Helium과 Neon의 適當한 energy 準位의 圖表이다. laser 作用은 Neon 2S와 2P 및 3S와 3P 準位 사이에서 發生한다. 上側 laser 準位에서 쉽게 볼수 있는 2S와 3S는 各各 Helium의 2^3S_1과 2^1S_0 準安定準位에 近似的으로 一致하고 있다. laser는 Helium과 Neon의 近似的으로 10 : 1의 比로 混合한 것을 使用하여 約 1 torr의

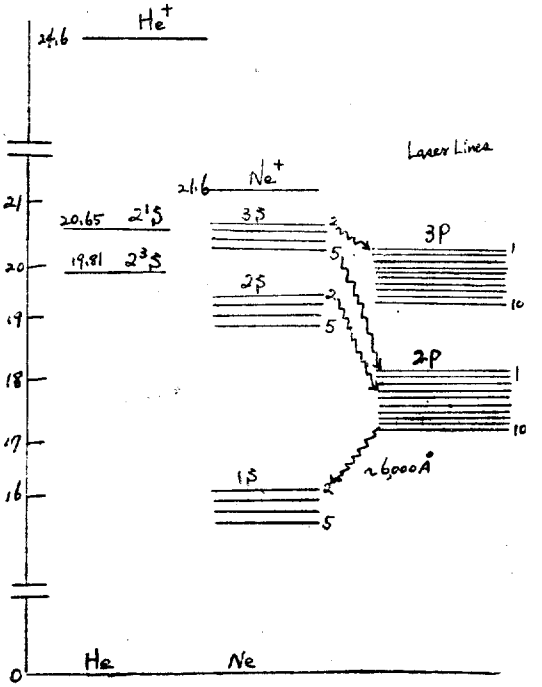

그림 1. He-Ne laser의 에너지 準位

全體 壓力을 갖도록 한다. 放電은 混合 氣體內에서 電子를 生成하고 에너지를 갖인 電子는 Helium의 基底狀態 原子를 2^3S_1과 2^1S_0의 狀態로 勵振한다. 이두 準位는 準安定 狀態이므로 比較的 긴 壽命을 갖고 있으며, 2^3S_1과 2^1S_0 準位의 population 密度는 높다. 2^1S_0 準安定原子는 (Neon 基底狀態의 二種과 不一致) Neon 原子를 2S 準位로 勵振하고 다시 基底狀態로 되돌아 보낸다. 準安定 狀態 準位와 Neon에서 準位사이의 實效 energy 一致에 對하여

(數 kT) 勵振한다. 2^3S_1은 Neon을 2S 準位로 우선 勵振하고 같은 모양으로 2^1S_0 準安定은 Neon의 3S 準位를 勵振한다.

下側 laser 準位인 2P와 3P는 比較的 드문 population이다. Population 逆轉은 Neon에서 2S와 2P, 2S와 2P 및 3P 準位사이에서 이뤄진다. 勿論 이것은 2S와 3S 準位의 壽命은 2P와 3P 準位에 對한 壽命과 比較하여 더 긴 것을 意味한다.

모두 열 한가지의 2S—2P 遷移가 있고 한개의 2S—2P 遷移와 한가지 3S—3P 遷移가 laser 發振에 對하여 報告되여 있다. 遷移의 2S—2P group은 1과 1.5μ 사이에 놓이고 3S—2P 遷移는 6388Å과 3S—3P 遷移는 3.39μ에서 있게 된다. (**表 1** 참조)

最近에 Helium의 2^1S_0 準安定은 亦是 Neon의 $4f$ 準位의 選擇 population에 重要하다. 이것에 關한 많은 論文이 報告되고 있는데 特히 $4f$—$3d$의 遷移의 數와 Helium Neon 放電 laser 發振에 對하여 보면 **表 2**과 같은 遷移와 波長을 볼 수 있다. 約 55GC 떨어져 있는 이들 遷移의 접근한 双은 재미 있고 傳導 beat 實驗에 퍽 재미가 있을 것이다.

表 1. (He-Ne) laser 發振 波長

波長λ(μ)	遷 移 (paschen)	利得/m (%)	出力(mW)
0.6328	$3S_2$—$2P_3$	12	10
1.0798	$2S_3$—$2P_7$	12	10
1.0844	$2S_2$—$2P_6$	12	10
1.1143	$2S_4$—$2P_8$	12	10
1.1180	$2S_6$—$2P_9$	12	10

表 2. He-Ne laser 發振의 $4f$—$3d$ 遷移

波長(μ)	遷 移	
	paschen	Racah
1.8281	$4V$—$3'_4$	$4f[^9/_2]_{4,5}$—$3d[^7/_2]^0_4$
1.8287	$4V$—$3d_4$	$4f[^9/_2]_4$ —$3d[^7/_2]^0_3$
1.8307	$4Y$—$3d_3$	$4f[^5/_2]_{2,3}$—$3d[^3/_2]^0_2$

2. 分離 勵振 傳達

이 勵振 傳達에 해당되는 氣體 laser로는 Neon-Oxygen 및 Argon-Oxygen laser이다.

그림 2는 Neon과 Argon, 分子 및 原子 Oxygen의 適當한 準位에 對한 energy 準位를 보인 것이다. laser 作用은 8446Å에서 일어나고 原子 酸素의 3P, $3P_2$—$3s^3S_1^0$ 遷移에 對應한다.

(a) Neon과 Oxygen laser의 경우

Neon ls 準安定 原子, 電子 充滿에 依한 勵振은 分子酸

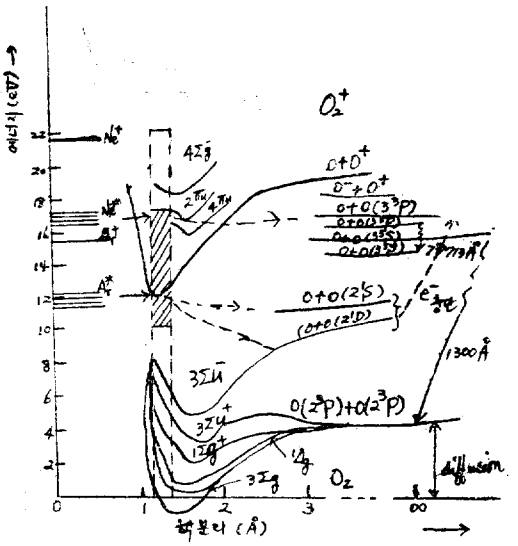

그림 2. Ne-O 및 Ar-O laser의 에너지 準位

素와 一致하지 않는다. 二種의 collision 동안 Neon 原子는 그의 基底狀態로 돌아오고 酸素分子는 上側 laser 準位 3^3P에서 한 酸素 原子를 주고 다른 것은 原子 酸素의 基底狀態에 있게 된다. 그 反應式은

$$Ne^*(^3P_1,\ ^3P_0)+O_2\longrightarrow O(^3P)+O+Ne \qquad (1)$$

여기서 energy는 必要한 一致 條件이 있고 그러나 이 條件은 Helium-Neon의 경우보다 훨씬더 엄격하다. 왜냐하면 酸素 laser에서 collision은 둘 대신 세 原子를 갖이기 때문이다. Neon의 다른 ls 準安定은 3^3S와 3^5S 準位의 勵振을 일으킨다. 즉

$$Ne(^3P_2)+O_2\longrightarrow O(^3S,\ ^5S)+O+Ne \qquad (2)$$

反應式(2)가 이루는 斷面은 反應式(1)의 그것보다 더 적은 것을 알 수 있다. 3^3P와 3^3S 準位의 適當한 壽命은 위의 두 勵振過程과 같이 3^3P와 3^3S 準位 사이의 population 逆轉을 일으킨다.

(b) Argon-Oxygen laser의 경우

이것은 前者와는 달리 原子酸素의 3^3P 準位의 選擇 population을 내는 두 段階 過程을 이룬다.

$$Ar(1s)+O_2\longrightarrow O+O+Ar \qquad (3)$$

여기서 O*는 2^1S 또는 2^1D 準安定 原子를 表示한다.

$$O^*+e+(energy)\longrightarrow O(^3P)+e \qquad (4)$$

Neon-Oxygen과 Argon-Oxygen의 경우에 얻는 population 逆轉은 비록 이 두경우의 理想氣壓은 다르더라도 대개는 같다. 여기서 3遷移가 $3^3P_{0,1,2}$—3^3S_1 準位사이에서 可能하다. laser 發振은 8446Å에서 3^3P_2와 3^3S_1 準位 사이에서 發生한다. 3^3P_2—3^3P_1 遷移에 對應되는 fluorescence 線의 peak 上에서 laser 發振이 일어나지 않는다는 것을 보면 재미 있을 것이다. 그러나 約 1~3GC 앞쪽으

로 더 짧은 波長만이 同一하지 않은 것으로 나타나는 可能한 理由이다. 또 吸收線은 8446Å 線에 接近한다.

最近에는 光 laser 發振은 Carbon, Nitrogen, Oxygen, 및 Sulfur 等 여러 二原子 및 多原子 分子의 分離로 그의 原子 遷移의 數를 얻는다. 아래에 이에 對하여 대강 說明한다.

(c) Carbon

Carbon 에서 laser 作用은 Helium 이나 Neon 이 CO 또는 CO_2 을 갖는 放電에서 또는 CO_2 의 分離에서 얻어진다.

氣體 壓力은 CO 또는 CO_2=0.01 Torr+Helium=2 Torr 및 CO 또는 CO_2=0.01 Torr+Neon=1 Torr 로 使用한다. 發振에서의 laser 波長은 얻어졌고 그의 可能한 分類는 表에 보인다. 또 **그림** 3은 laser 遷移의 原子 炭素의 energy 準位圖表 3에를 보인다. CO+He laser 의 경우에 energy 적으로 He 의 2^3S_1 準安定 原子는 10,589A 에 對하여 炭素에서 上側 laser 準位에 populating 한다. 그리고 14,539Å 遷移를 한다. (**그림3 참조**)

(d) Nitrogen

無線 周波數는 NO 또는 N_2O 中의 0.03 Torr 을 포함하여 放電하고 Helium 의 2 Torr 또는 Neon 의 1 Torr 가 Nitrogen 의 二原子 遷移위에 laser 作用이 나타난다. 이 遷移의 可能한 分類는 **表 3**에 보인다. 이 laser 遷移는 14,544Å 이고 炭素의 14,639Å 遷移에서 約 96GC 차이가 있고 beat 實驗에 재미 있을 것이다. **그림 4**는 laser 遷移

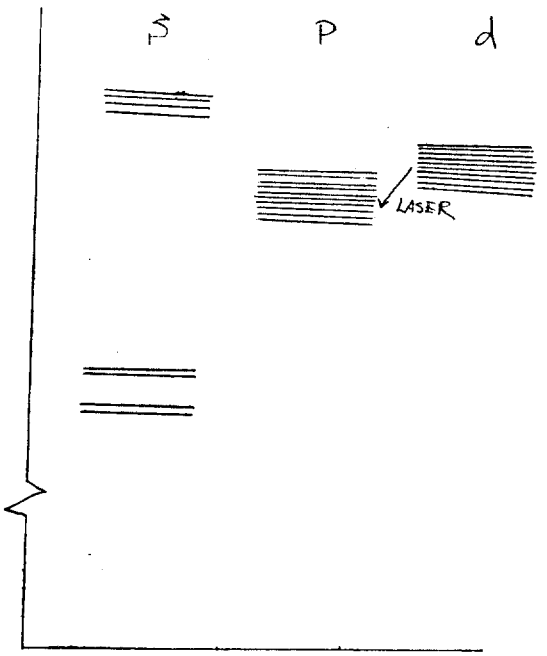

그림 3. Ar, Kr, Xe 의 에너지準位 表示

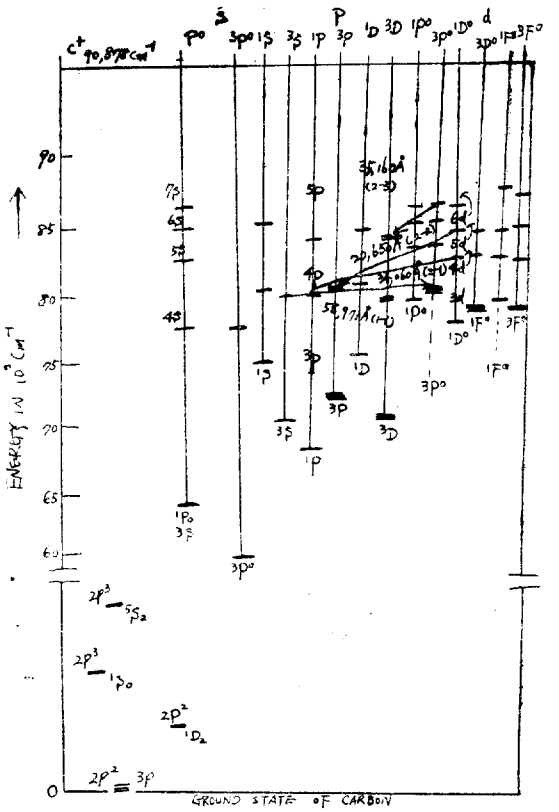

그림 4. Laser 發振에서 炭素 遷移의 炭素 에너지準位

에 對한 Nitrogen 의 energy 準位圖表이다.

(e) Oxygen

O_2+Ne 와 O_2+Ar 放電에서 laser 作用은 위에서 대개 說明했다. Laser 作用은 Oxygen 의 $3p^3P_2$—$3s^3S_1^0$ 遷移에 對應하는 8446A 에서 發生한다. 이것은 역시 CO, CO_2 +He, Ne, 또는 NO, NO_2+He, Ne 을 포함하는 放電에서 求할수 있고, 實際로 Carbon 과 Nitrogen 에서 laser 作用에 對하여 說明한 것과 같은 壓力으로 原子 酸素의 $3p^3P_2$ —$3s^3S^0_1$ 遷移에서 發生한다. Oxygen 에서 얻어지는 laser 出力은 적어도 O_2+Ne 또는 O_2+Ar 에서 얻어지는 것만큼은 强하다.

表 3. C.N. 및 S 에서 laser 發振 波長

氣　體	波　長 (Å)	可能한　分類
Caybon	10,689	CI $^3p^3D_3-3s^3P^0_2$
	14,539	CI $3p^1P_1$
Nitrogen	13,583	NI $3p^3S^0_{1/2}-3s^2P_{3/2}$
	14,544	NI $4s^4P_{5/2}-8p^2D^0_{5/2}$
Sulfur	10,455	SI $4p^3P_2-4s^3S^0_1$
	10,628	SI $4p'^1F_3-4s'^1D^0_2$

(f) Sulfur

SF_6의 0.03 Torr 또는 2 Torr의 Helium을 갖는 SF_6 (Sulfur hexafluoride)의 0.03 Torr을 포함한 放電에서 두 遷移는 laser發振에서 보았다. 이것도 表 3에서 볼수 있다. 그들의 둘다는 原子 Sulfur의 遷移와 同一하다. Sulfur의 10.455Å 遷移는 이미 알려진 laser發振에서 Oxygen의 8446Å 遷移와 확실히 類似한다.

(g) Bromine

Argon 1.8 Torr를 갖는 Bromine 0.09 Torr를 포함한 放電은 laser作用이 8446Å 근처의 아주 가까운 간격의 波長을 낸다. 이들 波長은 1m 높이의 resolution grating spectrometer로 測定했다. 그 波長들은 **表 4**에서 알 수 있다.

表 4. 波長 (A in Air)

8446.28Å
8446.38Å
8446.70Å
8446.79Å

3. 電子 充滿 勵振

순수한 noble gas laser는 이 勵振 mechanism을 갖는다. 하나는 한 氣體만을 포함했으므로 energy 一致 問題는 일어나지 않는다. 電子 充滿 勵振은 準安定 에너지遷移에 依한 勵振보다 순수한 noble gas 放電에서 laser作用을 얻는 더 一般的이고 實用性 있는 技術이다. 이 mechanism은 여기서 간단히 說明한다. Ar, Kr, Xe 및 Xe에 對한 energy 準位圖表는 近似的으로 類似하고 近似 圖表는 **그림 5**에 그렸다. Neon의 경우는 매우 類似하다.

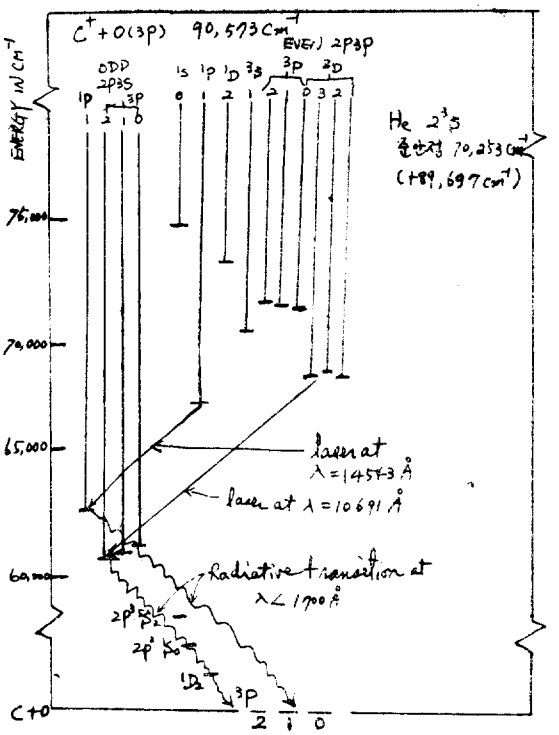

그림 5. Laser發振에서 Ni遷移의 에너지準位

s準位의 二次 group이 Ar, Kr, 및 Xe에 對照하여 첫 d狀態 아래로 떨어진다. 모든것 Neon, Argon, Krypton, 및 Xenon의 基底狀態는 채워진 p-shell이 5個의 電子를 가지고 있다. 上側 laser準位(이것은 s 또는 d狀態이다)는 光學的으로 强한 眞空 紫外線 遷移를 通하여 基底狀態와 連結돼 있다. 이런 勵振準位에 對하여 우리가 아는 電子 充滿에 依한 原子 勵振의 確率은 매우 높다. 그러나 氣體壓力에 對하여 使用하고 s나 d狀態에서 基底狀態로 眞空 紫外線 遷移은 完全히 포위된다. 이것들 s와 d의 原子들은 더 낮은 p狀態로 放出 遷移을 通하여만 實效的으로 減少한다. 즉 이것은 더 낮은 laser準位이다. 더 낮은 laser準位는 選擇法則에 依한 基底狀態와 光學的으로 連結돼 있지는 않다. 여기서 基底狀態로부터 原子는 어느 適當한 確率로 電子가 充滿된 것에 依하여 이들 p準位까지 直接 勵振하지 못한다. 이들 p準位는 强한 可視光線을 通하여 감쇄하고 可視光 近處에서 더 낮은 1s狀態로 遷移한다. 그러나 實效的으로 s와 d狀態는 p準位와 比較하여 긴 壽命을 가지고 또 勵振 確率은 가장 적당하며 故로 一般的으로 s와 p, 및 d와 p 狀態사이에 population 逆轉이 일어난다.

위의 說明은 下側準位의 경우에만 適用되는 것을 보인다. 上側 準位에 對하여서는 이런 仔細한 說明이 돼있지 않다.

參 考 文 獻

1. White, A.D.: Proc. IRE. 50 (1962), 1697.
2. Patel, C.K.N.: J. Appl. phys. 33(1962), 3194.
3. Chang, W.S.C.: Lasers and Application, Ohio State Univ. press., 1961.
4. Brotherton, M.: Masers and Iasers. McGraw-Hill book Co, Inc. 1964.
5. Vuylsteke, A.A.: Elements of Maser theory. D. Van Nostrand Company, Inc, 1960.
6. White, H.E. Introduction to Atomic Spectra. McGraw-Hill book Co. Inc. 1957.

(1965年 10月 8日 接受)