

메이서(Maser)와 레이서(Laser)

(I)

趙
(Chul)

哲*
(Cho)

메이서(maser) 와 레이서(laser)란 무엇인가?

筆者は 메이서와 레이서에 對하여 되도록이면 平易하게 定性的으로 記述하려고 한다.

“Maser”란 말은 Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation. 또 “Laser”란 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation 의 略字이다.

이 메이서나 레이서는 眞空管 原理에서 使用되는 自由電子代身 原子의 拘束電子를 使用하여 에너지를 發生하든가 增幅作用을 하고 있다. 刺戟放射(Stimulated emission)란 말은 原子에서 에너지放射가 있기 위해서는 拘束電子에 자극을 줘야 하기 때문에 생긴 것이다.

microwave 란 말을 붙인 것은 電磁에너지中 이 周波數 範圍內에 該當되는것에만 利用된다는 것이고 이와 마찬가지로 光(light)은 電磁輻射中 이 빛의 波長範圍에서 作用된다는 것을 말한다. 따라서 이 메이서나 레이서는 매우 높은 周波數範圍에서 使用되는 에너지發生裝置 또는 增幅器라고 生覺할 수 있다. 이 메이서나 레이서의 動作原理는 眞空管增幅器의 動作原理와는 다르므로 따라서 그 動作原理를 理解하려면 새로운 概念이 必要하게 된다.

科學技術의 發達과 함께 過去의 電子機器의 性能은 그 限界에 到達하게 되었고 通信, 天文學, 醫學, 産業, 科學研究分野等에서 이 메이서와 레이서는 새로운 機會와 可能性을 提示해주고 있다.

메이서와 레이서는 무엇을 할 수 있는가?

레이다에서 受信된 弱한 反射信號를 메이서를 使用하여 增幅하면 從前보다 이 레이다의 範圍를 더 넓일수가 있다. 또한 메이서는 보통의 受信機器要素가 갖고 있는 騒音(noise)보다 적은 騒音特性을 갖고 있으므로 從前의 受信器로서는 그 騒音 때문에 그 소리를 分別할 수 없던 먼거리에 있는 放送局의 소리도 들을 수가 있다. 이 低騒音特性 때문에 이 메이서는 電波望遠鏡(radio telescope)에 아주 適格이다.

이 메이서와 레이서는 醫學分野에서 化學反應을 일으킬 수 있는 可能性을 갖고 있다. 換言하면 에너지束으로 集束한수가 있어 모든 能量을 單一細胞內에 集中시켜 纖維의 特定部分을 破壞한다든가 또는 手術을 할 수 있다. 또 레이서束은 두터운 金屬板을 切斷할 수도 있고 이로부터 殺人光線의 可能性도 生覺할 수 있다.

메이서나 레이서束은 電波와 同一한 性質도 갖고 있음으로 通信에도 利用할 수 있다. 이 메이서나 레이서束은 周波數 및 出力이 높은 利點이 있고 또한 한 點에 集中시킬 수 있어 保安上에도 매우 優利한 點을 갖고 있어 이의 特性은 매우 能率이 좋은 通信系統을 이룰수 있게 한다.

이 以外에도 메이서나 레이서束은 物質의 아주 精細한 構造를 알 수 있는 高性能分光器, 매우 正確한 原子時計, 地球磁場을 測定하는 銳敏한 磁力計 또는 一般相對性理論을 確認하는 手段等으로서도 利用할 수 있다.

以上 列記한 것은 利用의 極히 一部分에 지나지 아니 하니 앞으로의 利用度는 얼마나 될런지 알수 없다.

메이서와 레이서機器間의 差異

이들 兩者사이의 本質的인 差異點은 그 使用目的에 따른 周波數動作範圍, 使用되는 材料의 差異, 採用된 技術 및 設計의 差異等이나 이 兩者는 모두 拘束電子에 能量을 利用한다는 同一한 原理로서 動作하고 있고 이 點이 自由電子를 利用한 다른 增幅器의 原理와는 判異하게 다르다.

메이서와 레이서의 原理

에너지 準位

各原子는 그 個個의 電子에 特有한 어떤 에너지準位(어떤 에너지狀態)를 갖고 있고 또 이는 이 原子에 屬하고 있는 個個의 電子의 에너지準位에 依하여 決定된다. 이와 같은 原子의 集團은 熱運動等에 依하여 항상 高低에너지 狀態사이를 變遷하고 이 때 이와 같은 許容 에너지狀態內의 原子分布狀態는 印加電磁輻射가 없는 경우 볼츠만法則(Boltzmann's law)에 따른다. 이 各 에너지準位內의 原子의 數를 制御할 수 있는 것이 메이

* 正會員 : 서울工大電氣工學科 助教授

서나 레이저에너지를 얻는 중요한 機能이다.

볼츠만의 法則은 어떤 特定된 溫度狀態下에 있는 原子나 分子들로 構成된 集團內에서의 에너지分布狀態를 表示한 式으로서 먼저 言及한바와같이 外部에서의 印加 電磁輻射가 없는 경우의 어떤 特定絕對溫度 T 下에 있는 熱的 平衡狀態에 있는 原子集團內에서의 어떤 에너지單位內의 原子의 數는

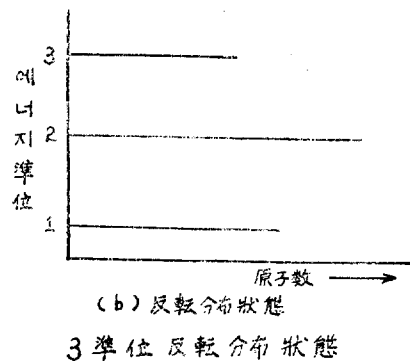
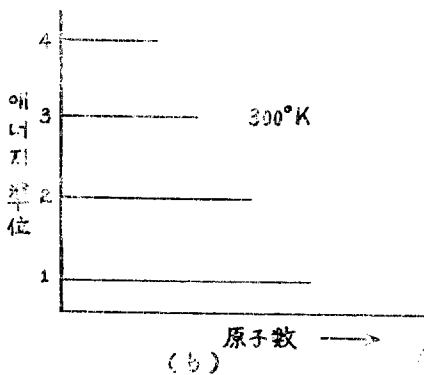
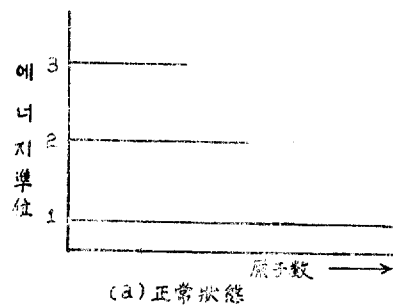
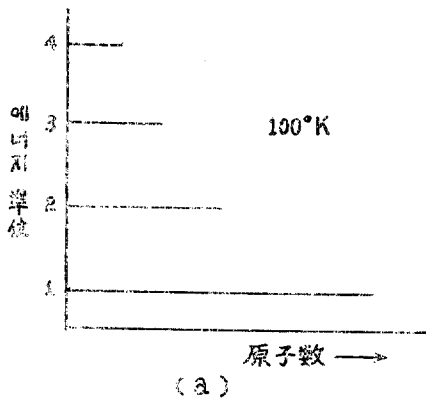
$$N_2 = N_1 \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{kT}\right)$$

로 表示된다. 여기서 E_2 및 E_1 는 서로 隣接하고 있는 두 高低에너지 이고 N_2 , N_1 는 그 各各狀態에 있는 原子의 數, k 는 볼츠만常數(Boltzmann constant)이다. 이 式에서 보듯과 같이 溫度가 上昇하면 電子의 活動力이 增加하게 되고 따라서 原子는 高低에너지單位사이를 不規則하게 遷移하게 된다. 原子는 偶然한 電子衝突에 의하여 高에너지狀態로 뛴다가 다시 低에너지狀態로 되돌아 오게 되는데 이 때 電磁輻射放射가 수반된다. 이것이 自然放射이고 이는 그 不規則性때문에 인코히런트輻射(incoherent radiation)이다. 卽 이 輻射는 各의 한個의 스펙트럼線(spectral line)이라고 볼수있는 非우

좁은 周波數帶로 되어있다.

다음 코히런트輻射(coherent radiation)(이는 單一周波 卽 한個의 스펙트럼線만 갖고 있다)를 얻기 위해서 放射를 어떻게 制御하는가를 보기로 한다. 먼저 나온式에서 알 수 있는 바와 같이 에너지單位가 높을수록 原子의 數는 減少하고 있고 또한 溫度가 높을수록 上位單位는 原子를 더 많이 가지며 이것이 그림에 표시되어 있고 이 그림은 勿論 各에너지單位의 平均原子數를 나타내고 있다. 여기서 果意할 點은 溫度가 높을수록 高低에너지單位間에 그 含有하는 原子數에 差異가 적어지고 있는 點이다.

이제까지는 熱的 平衡狀態에서 論議했는데 萬一 어떤 方法으로 해서 高位에너지單位가 低位單位보다 原子를 더 많이 갖일 수 있게 하면 이 狀態를 反轉分布(population inversion)라고 부르고, 이것이 레이저 및 레이저機構를 理解하는 基本概念이 된다. 이 反轉分布狀態가 다음 그림의 (b)에 表示되어있다. 이 그림은 3單位 에너지分布狀態이고 (a)는 假想的인 境遇의 것이고 (b)에서는 單位 (1)과 (2) 사이에 反轉分布狀態가 나타나 있다. 레이저나 레이저에서 이와 같은 反轉分布狀態를 가져오게 하는 여러가지 方法에 對해서는 後에 言及하기로 한다. 이와 같은 反轉分布狀態는 熱的 不平衡狀態이므로 오래 持續되지 못한다. 어떤 原子들은 不規則하



假想的 에너지 單位 分布圖

게 에너지가 낮은 상태로 되돌아가 인코herent輻射를 이룬다. 原子를 低에너지準位로 되돌아가게 하는 두 번째 방법은 外部에너지源에 依하여 자극을 주는 방법이다. 어떤 방법에 依하여 事前에 에너지가 蓄積된 原子群에 制御된 刺戟을 주면 코herent메이서 또는 레이서에 에너지를 얻게 된다. 反轉分布狀態의 發生과 低準位에로의 歸還의 制御가 메이서와 레이서作用의 基礎가 된다.

메이서와 레이서의 作用

量子論의 基本概念에 依하면 한 原子 또는 한 系는 한 許容에너지準位로부터 다른 許容에너지準位로 不連續인 跳躍即 遷移를 할 수 있고 이 때 이 跳躍이 에너지의 下向 또 上向跳躍인가에 따라 電磁輻射光子의 放射 또는 吸收를 同伴한다. 이 光子는 이 跳躍에너지 差를 放出하든가 또는 供給한다. 放射 또는 吸收된 光子의 周波數 f 는 프랑크의 法則(Planck's law)에 依하여 에너지 差 ΔE 와 다음과 같은 關係가 있다.

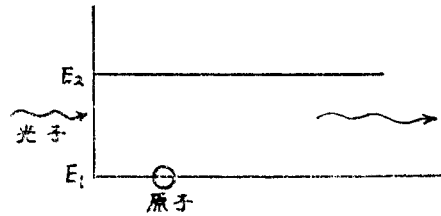
$$\Delta E = hf$$

여기서 h 는 프랑크常數(Plank's constant)이다. 한 例로서 可視光線輻射에 該當하는 軌道에너지準位差 ΔE 는 數에 10¹⁹ 볼트(ev)程度이다. 輻射가 原子群中을 通過할 때 다음 세가지 경우가 일어난다.

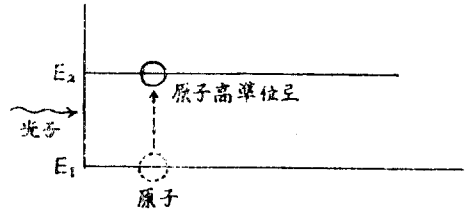
1. 輻射(光子)가 에너지授受없이 原子群內를 通過하는 경우 이는 入射輻射의 에너지가 原子의 두 許容에너지準位差와 같지 않을 때이고 이런 경우에는 에너지授受가 일어나지 않는다. 이는 即 輻射가 이들 原子群과 相互作用을 이룰 수 있는 適當한 振動數를 갖지 못함을 意味한다. 이는 다음 그림 (a)에 該當한다.

2. 輻射가 原子群에 吸收될 境遇, 이는 原子集團의 두 許容에너지準位 사이의 에너지差가 入射光子의 에너지와 같고 低에너지準位의 原子數가 高準位の 것 보다 많은 경우이며 原子가 光子를 吸收하고 이 光子에너지가 原子의 內部에너지化하는 경우이며 이 때 原子는 勵起狀態에 있다고 한다. 이는 그림 (b)의 경우이다.

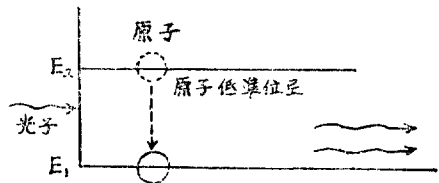
3. 輻射와 原子群에서 放射되는 경우, 이는 高에너지準位가 低準位보다 더 많은 數의 原子를 갖고 있는 경우이고 그림 (c)의 경우이며, 反轉分布狀態이다. 이와같은 상태를 얻는 한 방법은 充分히 많은 數의 原子가 光子를 吸收하게끔 하는 것이다. 이 勵起原子들은 自然放射에 依하여 餘分의 吸收에너지를 光子의 形態로 放出하면서 低準位狀態로 되돌아간다. 이것이 普遍的인 光源에서 일어나는 現象이고 이 光子의 自然放射는 不規則하기 때문에 結果로서 나오는 빛은 incoherent이다. 그러나 反轉分布狀態가 存續하는 사이에 다시 말하면 勵起原子들이 不規則하게 低準位狀態로 되돌아가기 전에 合當한 에너지를 갖는 入射輻射(光子)가 이들 勵起原子에 衝突한다면 이 勵起原子들은 光子들을 放出하



(a) 光子 에너지 $\neq E_2 - E_1$
光子 통과



(b) 光子에너지 = $E_2 - E_1$
 E_1 의 原子數 > E_2 의 原子數
光子吸收

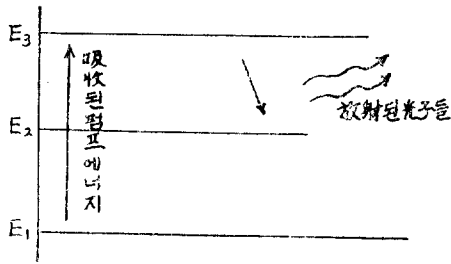


(c) 光子에너지 = $E_2 - E_1$
 E_2 의 原子數 > E_1 의 原子數
入射光子 + 放射光子 \Rightarrow 放出

輻射 - 物質 相互作用

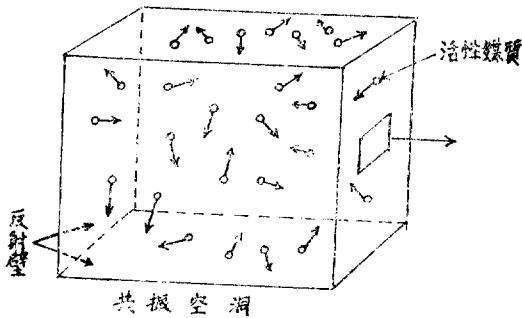
면서 低準位로 되돌아갈 것이다. 輻射光子들이 이와 같은 刺戟을 勵起原子들에게 주는 사이 이 原子들은 光子들을 放出하면서 低準位 상태로 되돌아가고 이 때 輻射되는 光子들은 輻射한 光子들과 位相이 같다. 이것이 메이서나 레이서의 基本原理이다.

다음 그림으로서 메이서나 레이서를 써서 增幅을 얻는 過程을 集約할 수 있다. 우선 그림에서와 같이 그것을 通해서 增幅을 얻고자 하는 媒質은 pump energy 라고 命名하는 輻射에 依하여 大部分의 原子들이 勵起狀態에 있게끔 活性化되어야 하고 그림에서 이는 準位 E_1 에서 E_2 에로의 에너지增加로 表示되어 있다. 이 狀態가 反轉分布狀態이다. 일단 이와 같은 反轉分布狀態가 얻어지면 合當한 周波數를 갖는 光子束은 上向보다 下向跳躍을 招來할 것이고 이 原子들은 에너지를 吸收하는 代身 放出할 것이고 따라서 보다 많은 光子가 放出되고 이는 또한



入射波는 이들 原子사이를 通過하는 사이에 增幅된다는 것을 말하며 따라서 더 많은 에너지를 갖고 나오게 된다. 이 過程이 그림에 表示되어 있는데 E_3 準位에 있는 原子가 入射光子에 依하여 흥동되어 準位 E_2 로 下方으로 跳躍하며 이러한 사이에 光子를 放射하고 있고 이 放射光子는 흥동 即 刺戟을 준 光子와 同相이 되고 있다. 위에서 말한것이 메이저나 레이저 增幅器의 原理이다.

다음 共振器(oscillator) 또는 에너지 發生器(generator of energy)라고 부르는 裝置의 原理를 살펴본다. (다음 그림 参照). 이 메이저나 레이저 共振器도 增幅器의 경우와같이 勵起狀態가 될 수 있는 原子集團이 그 媒質로서



必要하고 이를 原子集團이 勵起狀態에 놓이게 되면 그 直後 自然放射에 依하여 이들 原子中의 一部는 光子를 放出하게 된다. 그러면 共振空洞이라고 부르는 光子들이 그 壁에서 反射할 수 있는 그와 같은 壁으로 構成된 箱子속에 이들 光子가 갇혀져 있으므로 初期放射光子들이 이 箱子속을 反射에 依하여 往來하는 사이 다른 勵起原子들과 衝突하여 더 많은 光子를 放出케 하고 이와 같이 하여 漸次的으로 더 많은 勵起原子에 刺戟을 주게 되며 이 때 역시 衡動되어 나온 光子들은 衡動한 光子와 그 位相이 同相이다. 이렇게 하여 箱子속에는 波動이 形成하게 되며 이 波動의 세기가 充分한 크기를 갖게 되면 한쪽 端에서부터 밖으로 傳播하게 된다. 以上과 같은 過程에서 한가지 累贅한 것은 이 共振器作用의

初期는 增幅器의 그것과 同一하나 共振器에서는 衡動된 光子가 單純하게 傳播電波로 되는 代身 그 一部分이 다른 光子들을 얻기 爲한 衡動光子로서 即 歸還型의 光子로서 作用한다는 點이다. 그리고 이 共振空洞의 幾何學的인 크기는 時定된 周波數의 波動形成에는 도움을 주고 그 以外の 周波數를 갖는 波動은 減衰케 하는 그와 같은 크기를 갖게 한다. 共振을 繼續維持하기 爲해서는 光子들이 메이저나 레이저 材料속을 通過하는 사이에 一部 損失되므로 이 量을 補充하기에 充分할만큼 空洞內에서의 自體衡動에 依하여 얻어진 增幅이 커야 한다.

勿論 메이저나 레이저의 動作原理는 同一하나 實際的인 面에 있어 메이저는 增幅에 더 適合하고 레이저는 에너지 發生에 더 適合하다. 레이저는 一般的으로 그 騒音度가 比較的 높기 때문에 에너지 增幅에 適合하지 않다. 騒音으로 나타나는 自然放射는 周波數의 三乘에 比例하고 이는 마이크로波 近邊에서는 매우 낮으나 光波 領域에서는 信號對 騒音의 比率이 매우 나빠진다. 이와 같이 레이저가 增幅器로서는 과히 適合하지 않는 代身 아주 강한 固有光束을 發生하는 發生器로서는 아주 適合하고 이때 얻는 固有光의 性質은 低周波에서 通常의 電子機器를 使用하여 얻는 信號와 類似한 性質을 갖고 있다. 그러나 그 周波數가 매우 높기 때문에 通常의 信號보다 더 有利한 點을 많이 갖고 있다. 이 以外에도 그 強度라든가 線狀化 등의 레이저束이 갖고 있는 性質들은 그 利用面에서 매우 優秀한 利點을 갖고 있다. 一般的으로 말해서 메이저는 勿論 原子時計와 같은 共振器로서도 使用되기는 하지만은 低騒音 增幅器로서 使用되고 레이저는 電磁輻射의 共振器 또는 發生器로서 使用되고 있다.

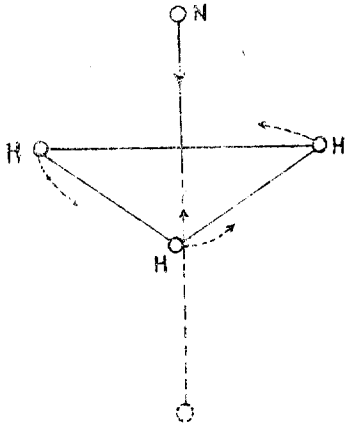
氣狀機器

메이저나 레이저에서 그 使用되는 材料가 氣體인 경우 이 機器를 氣狀메이저 또는 레이저(gas maser, laser)라고 부른다. 먼저 암모니아메이저(ammomia maser)에 對해서 생각한다. 암모니아는 NH_3 로 表示되는 氣體分子이고 그 構造는 다음 그림과 같다.

세개의 水素原子는 3角形을 이루고 空素原子는 이 3角形을 통해서 振動하고 있다. 이 때 水素原子들은 $3h$ 의 角運動量을 갖고 回轉하고 있고 그리고 空素原子의 振動數는 約 24,000 Mc/sec이다. 이 空素原子의 振動 때문에 이 암모니아의 最低에너지準位는 거의 同一한 分子數로 構成되는 두 개의 에너지狀態로 分割되며 이 때 두 狀態의 에너지차는

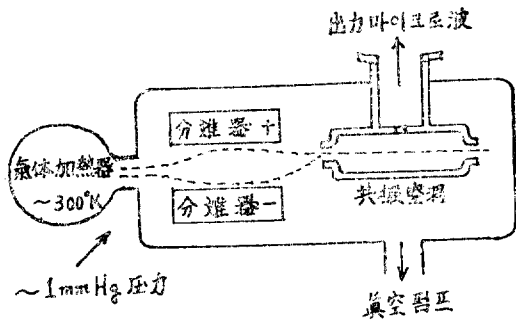
$$h\nu = h(23,870.14 \times 10^6) \text{ ergs}$$

이다. 다시 말하면 이 암모니아分子的의 에너지狀態는 水素原子들이 갖고 있는 角運動과 이 水素原子들에 對한 空素原子의 位置에 依하여 決定되며 따라서 空素原子가



한쪽에 있을 때와 그 反對쪽에 있을 때와는 이 암모니아分子的 에너지狀態가 다르며 이 차이가 2식의 값이다.

至今 다음 그림에 表示한 것과 같이 氣體分子를 加熱하면 어느 特定된 數의 分子들은 어느 特定된 時間사이에 高에너지 狀態에 놓이게 되고 일반 이와 같은 狀態

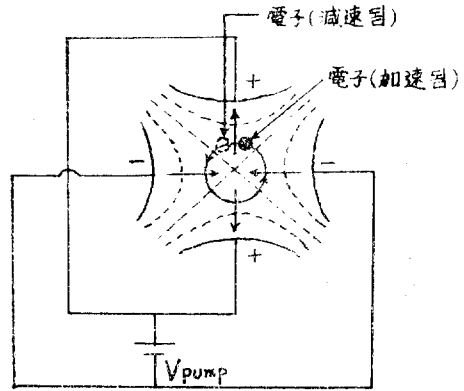


를 얻게 되면 메이저 作用을 얻기 爲해서는 이들을 低에너지 狀態에 있는 分子들과 分離해야 한다. 이 암모니아메이저인 境遇 이 分離作業은 電界를 써서 한다. 이 理由는 電界에서 받는 에너지는 高準位에너지 狀態에 있는 分子의 에너지는 더 增加케 하고 低準位 狀態에 있는 것은 더 減少케 하기 때문이다. 이것은 다음 그림으로부터 理解할 수 있다. 그림 (a)는 4極電極의 斷面을 表示하고 있고 이 때 電子들이 이 斷面을 通過 흐르고 있고 이 斷面に 垂直한 方向에 ((b)圖의 子軸方向) 磁束線이 있다고 假定하고 있다. (b)圖은 이 4極電極部分만을 다시 그린 것이다. 이와 같은 電極構造인 境遇 이 電極領域內의 電位狀態는 다음 式으로 表示된다.

$$V = k(y^2 - x^2)$$

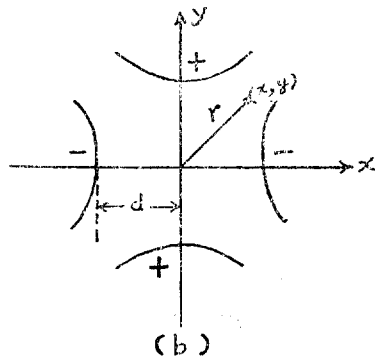
여기서

$$k = \frac{V_{pump}}{2d^2}$$



→ 標는 電子에 作用하는 힘.

----- (實線)은 等電位面을 表示함 (a)



(b)

따라서 電界는

$$E_x = -\frac{\partial V}{\partial x} = -2kx$$

$$E_y = -\frac{\partial V}{\partial y} = -2ky$$

$$\therefore E_r = \pm 2kr$$

그러면 正粒子的 에너지는 $\frac{1}{2}CE^2 = \frac{1}{2}C(2kr)^2$ (C : 常數)로 表示됨으로

$$W_r = \frac{1}{2}CE_r^2 = \frac{1}{2}C(2kr)^2$$

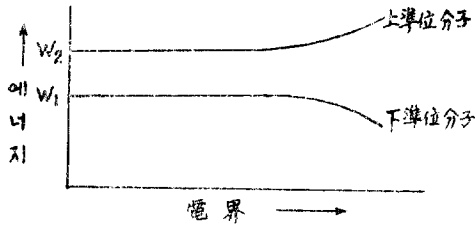
그러면 먼저言及한 Stark效果(다음 그림參照)에 依하여 上準位分子的 에너지는 增加할것이고 下準位分子的 에너지는 減少할 것임으로 即

$$W_{upper} = W_2 + W_p$$

$$W_{lower} = W_1 - W_p$$

그러면 粒子가 받는 힘 F 는 따라서

$$F_{upper} = -\frac{\partial W_{upper}}{\partial r} = -\frac{\partial W_p}{\partial r} = -4ck^2r$$

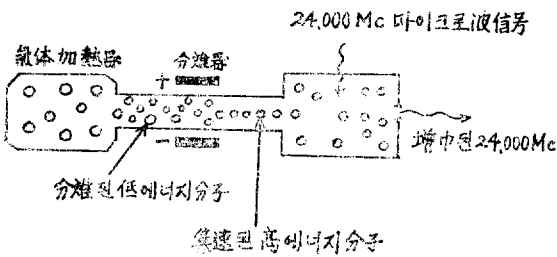


$$F_{lower} = -\frac{\partial W_{lower}}{\partial r} = \frac{\partial W_{upper}}{\partial r} = 4ck^2r$$

이 두 식으로 부터 低準位粒子는 壁即 極面쪽으로의 힘을 받고 또 上準位에 있는 粒子는 軸쪽으로 밀리게 됨을 알 수 있다.

이와 같이하여 高準位狀態에 있는 分子와 低準位에 있는 것과의 電界를 써서 分離할 수 있음을 알았다. 이것이 即 먼저나온 그림에서의 分離器의 作用이다.

이와 같이 해서 分離器에서 나온 高準位分子는 共振空洞에 들어가게 되는데 이 分離器를 또한 集束器(focuser)라고도 부른다. 그 理由는 다음의 簡單化된 그림에서 보는 바와 같이 高準位에너지 分子가 軸上에 集束되어 있게 되기 때문이고 이들을만 空洞에 通過시킨다.



根本적으로는 먼저 言及한 바와 같이 共振空洞은 特定周波數에 共振할 수 있는 寸法을 갖고 있는 매우 反射係數가 큰 金屬板으로 만들어져 있다. 이렇게 하여 이 空洞속에 있는 高에너지分子는 인제 메이서 作用을 하게 된다. 이 共振空洞에는 그림에서 알 수 있는 것과 같이 암모니아分子以外에 마이크로波信號도 들어 오게 된다. 그러면 이 마이크로波光子는 여러번 空洞內에서 反射하는 사이에 高에너지 狀態로 있는 암모니아分子와 相互作用을 일으키게 되는데 이때 암모니아分子의 高低準位 사이의 에너지차가 24,000Mc(≈23,870.14Mc)이고 마이크로波信號도 24,000Mc이다. 이와 같이 이 兩者의 에너지가 꼭 같으니까 암모니아分子들은 光子를 放出하면서 低에너지準位로 跳躍하게 된다 이때 이 새로 發生한 光子는 入力信號光子와 同相이니까 結果적으로

入力信號의 에너지가 增加하는 셈이 된다. 萬一 充分한 量의 암모니아分子가 空洞속으로 흘러들어오면 光子放射機構가 持續性을 갖게 되어 入力信號를 遮斷해도 이미 衝動되어나온 光子가 다시 다른 分子에 衝動을 주어 거기서 또 새로운 光子가 나오는 등 하여 이 때 이는 增幅器 代身 共振器가 되어 버린다.

이 암모니아메이서의 特徵은 個個의 原子代身 分子의 에너지遷移에 根據를 두고 있다는 點이다.

이 암모니아메이서가 낼 수 있는 出力P는 單位時間에 空洞속으로 들어가는 分子數에 의해서 決定되고 다음식으로 表示된다.

$$P = \frac{1}{2} N h \nu$$

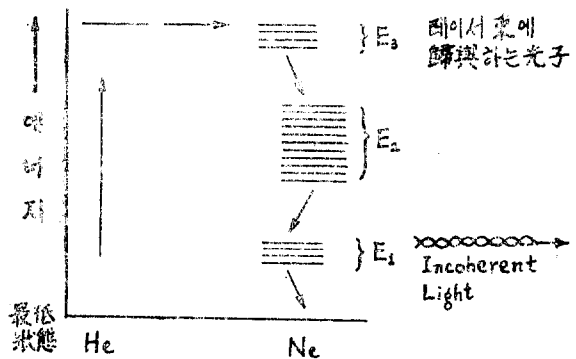
여기서 N는 分子數 hν는 遷移에너지이다.

勿論 上 式에다 遷移確率을 풀어야 하는 때 이 式은 最良條件인 1로 본 경우이다.

다음에는 液體과 氣體의 混成物로 된 氣體레이저에 對하여 生覺해 보기로 한다. 第1初期에 만든 H_e-N_e 레이저는 1m의 길이에 90% N_e 과 10% H_e 로 構成된 것이었다. 動作原理는 암모니아메이저인 경우와 같으나 pumping (反轉分布狀態를 招來하기 爲해 外部에서 能量을 加하는 것)하는 方法이 다르다.

氣體中에서 電氣放電이 일어나면 어떤 原子들은 勵起狀態가 되며 따라서 電子가 遊離되어서 나오며 이 遊離된 電子들은 電力源 即 放電을 招來한 電磁波周波數源으로부터 계속 能量을 받아 이 能量을 이들 電子가 만나게되는 다른 原子들에 주게 된다. H_e-N_e 레이저에서는 이들 電子가 衝突勵磁(collision excitation)에 의하여 H_e 原子를 高에너지準位로 勵起한다. 다시 말하면 勵起 에너지 即 펄프에너지는 電磁波周波數放電에서 얻어지고 이 放電過程에서 H_e 原子가 電子와 衝突하여 勵起狀態로 올라가는 것이다. (다음 그림 参照)

두 개 以上の 原子가 共存하고 있을 때에는 萬一 이



He-Ne 氣體 레이저의 에너지 準位圖