

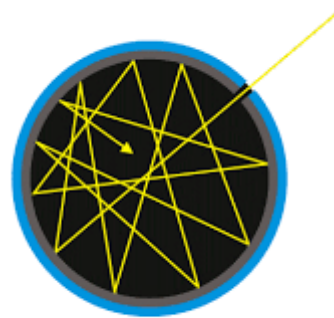
지난시간에는 레이저 빔의 전파 특성을 정의할 수 있는 M 스퀘어 및 BPP를 알아보았다. 이를 이용해 레이저 빔이 전파되며 생기는 일을 알 수 있다고 하였으며, 결과적으로 레이저 빔은 위치에 따라서도 그 모양이 달라 질 수 있다는 결론을 내렸다. 이번 시간에는 레이저가 어떻게 발진 되며, 어떤 물질을 사용하는지에 대해서 배우도록 한다.

## 1. 레이저 발진 원리 및 물질

레이저라는 것은 결국 좋은 성질을 가진 빛을 만드는 것이다. 그 소스는 전기, 빛, 열, 화학 에너지등의 다양한 에너지들을 쓸 수 있으며, 레이저 빛을 만들 수 있는 물질의 원자에 에너지를 공급하는 것을 펌핑이라고 한다. 펌핑된 원자는 유도방출을 일으키며, 레이저빔을 생성하는 구조물을 공진기, 증폭시키는 구조물을 증폭기라고 한다. 그러면 이제, 레이저를 어떻게 만드는지 그 원리부터 알아보도록 하자

### 1) 흑체 복사

흑체는 들어오는 에너지를 모두 흡수하는 것, 다시 말해 들어온 빛을 모두 흡수하는 물체를 말한다. 에너지를 흡수하면 물체의 온도는 올라갈 것이다. 그러면 온도가 고정되면, 들어오는 에너지와 나가는 에너지가 평행해야 할 것이다. 즉 흑체 복사라는 것은 에너지평형 상태라고 볼 수 있다. 그럼 이 흑체를 만들어보려면 어떻게 해야 할까?

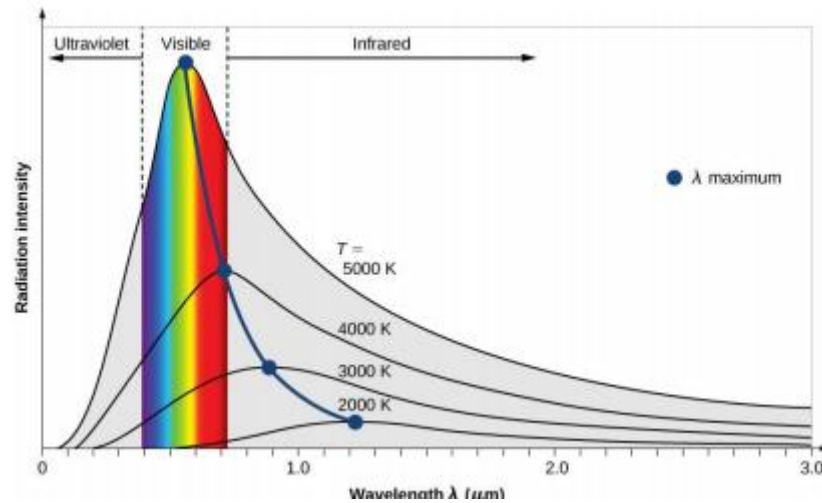


Conceptual Black Body

<Figure 1 – 이상적인 흑체 복사>

답은 위 그림과 같은 형태의 물체를 만드는 것이다. 그림에서 나온 물체는 빛이 조그만 구멍을 통해 들어와, 빠져나가지 못하고 내부에 갇히게 된다. 동시에 물체는 단열되어

외부와 에너지 교류가 일어나지 못한다. 이 상황에서, 이 흑체의 온도를 고정시킨다고 생각 해보자. 온도는 일정해야 하는데, 빛은 계속 들어오므로 동일한 양의 빛을 방출시켜야 할 것이다. 이것이 바로 흑체 복사이다. 이렇게 온도를 고정시켜놓고, 빛의 파장 대비 복사파 세기를 측정한 그림이 바로 다음 그림이다.



<Figure 2 – 파장 대비 흑체 복사 세기>

이를 식으로 나타내면,

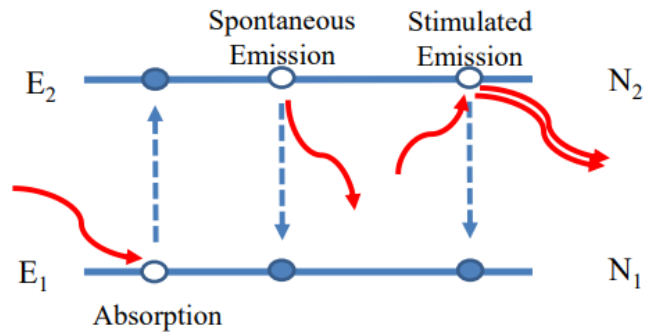
$$\rho(\nu)d\nu = \frac{8\pi\nu^2 d\nu}{c^3} \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

이며, 에너지는 온도의 4승에 비례한다. 그런데 이 식은 고전적인 빛의 해석과 전혀 맞지 않는 결과를 가지고 있다. 빛이 파동이라면, 모든 에너지 분포는 연속적이고, 시간적으로도 공간적으로도 끊기지 않아야 한다. 이 말이 맞다면, 흑체 복사의 결과는 파장이 짧아질수록 세기가 무한히 높아져야 한다. 그런데 위 그림은 파장이 짧아질수록 peak를 찍고 세기가 뚝 떨어지며, 온도가 올라갈수록 peak는 커지면서 점점 반 파장으로 다가간다. 이 두 현상은 기존의 이론으로 전혀 설명이 되지 않는 부분이었으며 이로 인해 빛이 불연속적, 다시 말해 양자화 되어 있다는 이론, 양자역학이 생기게 되었다.

이런 양자역학의 시작과 함께, 원자가 가지고 있을 수 있는 상태와, 분포에 대한 연구가 이루어지기 시작했다.

## 2) 볼츠만 분포와 아인슈타인 효과

불연속적인 빛은 다음과 같이 에너지 준위 그림으로 나타 낼 수 있다.



<Figure 2 – 에너지준위>

유도 및 자발 방출 등에서 빠져나가는 에너지는 빛의 형태로 나가게 되고, 천이된 에너지 준위만큼의 차이를 파장으로 가지게 된다. 이때 두 에너지 레벨 사이에 존재하는 원자의 비율이 따르는 분포가 바로 볼츠만 분포이다.

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

<볼츠만 분포 식>

식에서 볼 수 있듯, 볼츠만 분포를 따르는 원자들은 상위 레벨로 갈수록 거의 존재하지 않으며, 온도가 절대 0도에 가까워 질수록 원자가 위에 존재할 확률이 없어진다.

이런 상황에서, 두 가지 과정을 생각해 보자.

1. 외부로부터 에너지를 흡수한 전자는 어떻게 되는가?

이를 흡수라고 하며, 흡수되어 올라가는 확률은 밑에 있는 전자의 개수가 많으면 될 것이다. 또는 들어오는 에너지, 다시 말해 광자가 더 많으면 될 것이다. 이를 식으로 나타내면

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = -B_{12}\rho(v)N_1$$

2. 위 준위에서 떨어지는 전자는 어떻게 되는가?

위 준위에서 떨어지는 경우는 자발 방출과 유도 방출로 나뉜다. 이들 역시 위에 있는 전자의 개수가 많을수록 떨어질 확률이 커진다.

이를 식으로 나타내면

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = -A_{21}N_2, N_2(t) = N_2(0)\exp\left(-\frac{t}{\tau_{21}}\right)$$

이때  $\tau_{21}$ 은 전자의 수명, 즉 위에 머무를 수 있는 시간이다.

떨어지는 전자는 수명이 다 되어 떨어지기도 하지만, 외부로부터 들어오는 광자와 충돌하여 떨어지기도 한다. 이 과정을 유도 방출이라고 하며 똑 같은 천이의 과정이므로 빛이 나온다. 이 과정에서 나오는 빛들은 부딪힌 광자와 주파수, 위상, 방향이 모두 똑같다는 특징을 가지고 있다. 즉 빛은 유도 방출을 통해 증폭을 한다.

만약 열적 평형 상태가 되면 무슨 일이 일어날까? 평형 상태라는 것은 시간에 따른 변화가 존재하지 않는 상태이다. 즉, 다음의 식을 만족하게 된다.

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = -\frac{\partial N_2}{\partial t} = 0$$

$$B_{12}\rho(\nu_{12})N_1 = B_{21}\rho(\nu_{21})N_2 + A_{21}N_2$$

$$\rho(\nu_{12}) = \frac{A_{21}/B_{21}}{\left(\frac{B_{12}}{B_{21}}\right) \exp\left(\frac{h\nu_{21}}{kT}\right) - 1}$$

<평형 상태에서 흡수, 방출 전자의 관계 식>

이를 정리하면, Planck의 흑체 복사 식과 매우 유사한, 다음과 같은 형태를 지니게 된다.

$$\rho(\nu)d\nu = \frac{8\pi\nu^2 d\nu}{c^3} \frac{h\nu}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}$$

<Planck의 흑체 복사 식>

이 두 식을 맞추기 위해,  $B_{12}/B_{21}$ 은 1이 되어야 하고,  $A_{21}/B_{21}$ 은 앞의 상수가 되어야 한다. 이를 아인슈타인이 유도한 관련 식, Einstein relation이라고 한다.

$$\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi\nu^2 d\nu}{c^3} \quad \frac{B_{12}}{B_{21}} = 1$$

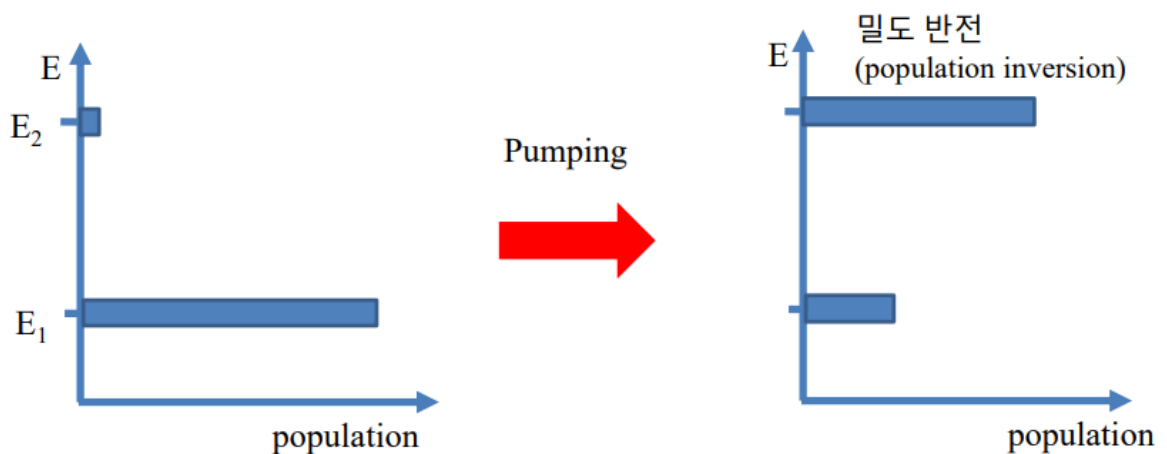
<Einstein relation>

이 과정에서 가장 중요한 것은, 유도 방출을 통해 빛이 증폭되었다는 뜻이다. 이런 레이저의 발생 원리를 생각 해 보면, 레이저가 왜 LASER인지 알 수 있을 것이다!

### 3) 밀도 반전

레이저가 잘 발생하기 위해서는, 당연하게도 lifetime이 길어야 할 것이다. Lifetime이 길수록 위에 있는 원자량이 많아 유도방출이 많이 일어날 것이며, 주로 희토류 계열이 이 lifetime이 큰 편이다. 그럼 충분히 큰 lifetime만 있으면, 레이저는 항상 발진될까? 답은 '아니다'.

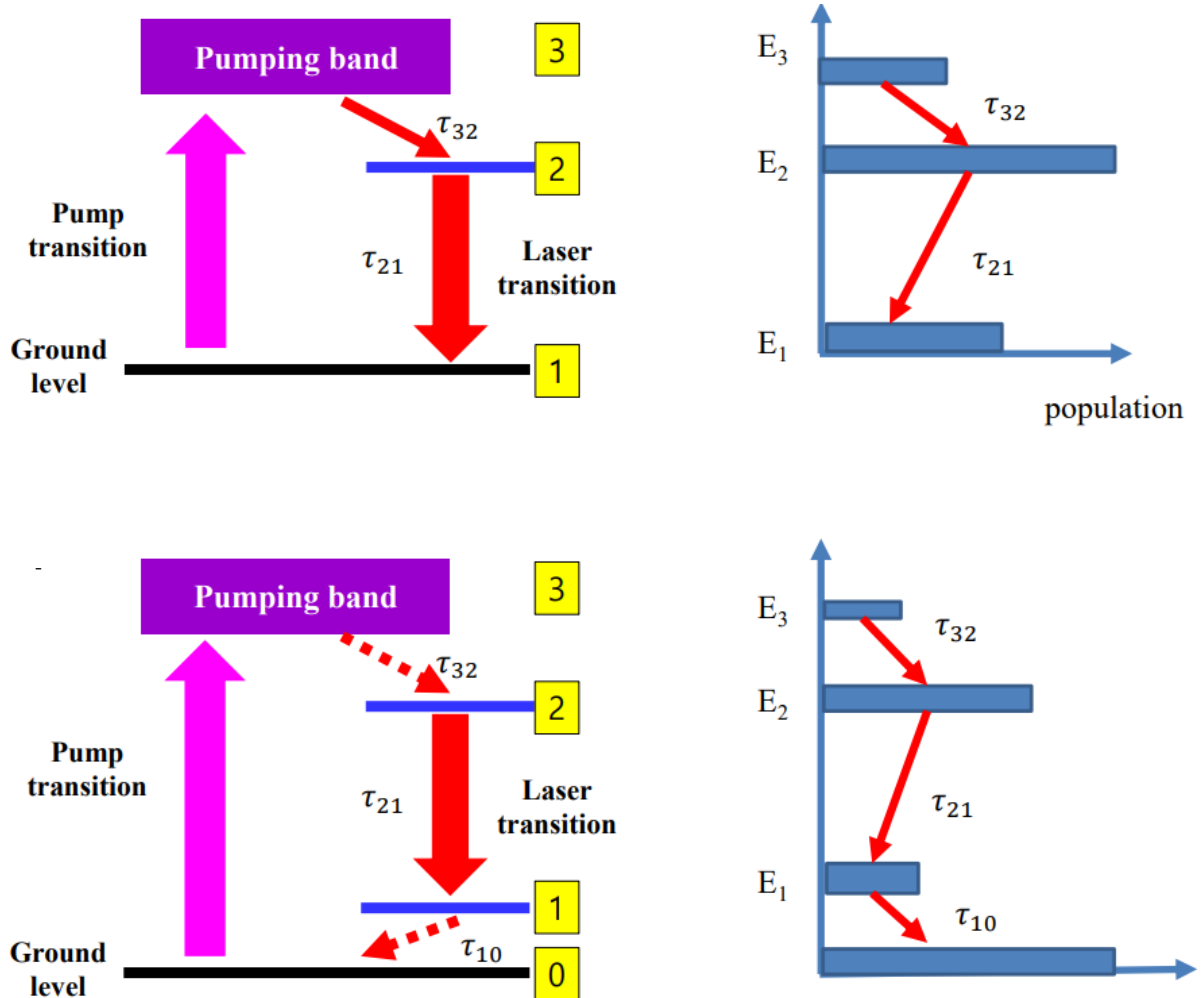
레이저가 일어나기 위해서는 결국 유도 방출로 인해 생기는 빛이 흡수보다 많아야 할 것이다. 위에 있는 많은 식을 통해 이를 생각해 보면, 결국 위에 있는 전자가 밑에 있는 전자보다 더 많이 존재해야 한다는 결론이 나온다. 이렇게 위의 에너지 레벨이 밑보다 높은 상태가 되면, 우리는 이를 밀도 반전이 일어났다고 이야기한다.



<Figure 3 – 밀도 반전>

그럼 모든 원소들은 밀도 반전의 상태만 유지하면 레이저를 뽑아 낼 수 있을까? 아쉽게도 그렇지 않다. 원자 준위의 레벨이 2개로만 유지되면 레이저는 생길 수 없다. 그 이유는 무엇일까? 두 레벨의 에너지 준위에서, 밀도 반전을 위해 외부에서 펌핑을 해 준다고 생각해보자. 펌핑으로 들어온 빛은 낮은 상태의 전자를 높은 상태로 올릴 것이다. 그런데 2레벨 상태에서는, 위가 더 많은 상태가 되면 위에서 내려가는 속도가 아래에서 올라가는 속도보다 빨라질 수밖에 없다. 2준위에서는 천이의 속도가 밀도에만 비례할 수 있기에 아무리 잘 만든다고 하더라도 밀도 반전의 상태를 만드는 것이 불가능하다. 이러한 점들 때문에, 레이저 발진에 있어선 2준위가 아닌, 3준위와 4준위를 사용하곤 한다.

즉, 레이저 발진을 위해서는 Lifetime이 길면서, 동시에 펌핑과는 분리가 된 상태로 밀도 반전을 유지할 수 있는 상태를 가지고 있어야 하며, 그 상태가 바로 3준위 또는 4준위의 개형이다. 자세한 형태는 다음의 그림을 참고하도록 하자



<Figure 4,5 – 3,4준위의 에너지 준위>

그림처럼 3준위, 4준위 형태를 가지고 있는 원자들은 펌핑으로 올라가는 준위와, 레이저의 유도발진에 영향을 주는 준위가 나뉘어져 있다. 펌핑으로 올라간 전자들은 lifetime이 짧아 매우 빠르게 2번으로 내려가지만, 2번에서 자발적으로 떨어지는 전자들의 lifetime은  $t_{32}$ 보다 매우 길다. 이로 인해 밀도 반전의 상태가 유지되며, 이 밀도반전이 유지되는 이상  $E_1$  -  $E_2$  만큼의 에너지를 가지는 레이저를 만들 수 있게 된다.

당연하지만,  $t_{10}$ 과  $t_{32}$ 는  $t_{21}$ 보다 매우 짧아야 하며,  $t_{10}$ 과  $t_{32}$ 과정에서 생기는 에너지는 열의 형태로 나가게 된다. 이는 양자 결함과 관련있는 분야이다.

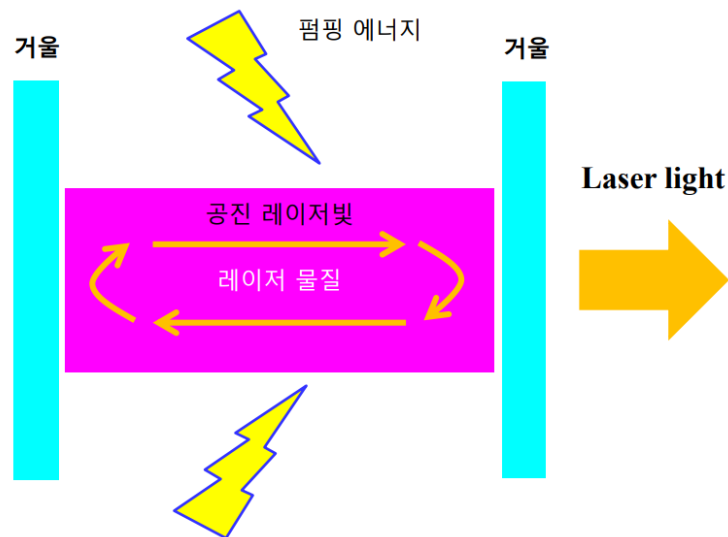
또, 레이저가 발진되기 위해서는 결국 밀도 반전이 일어나야 하기 때문에, 충분한 전압을 걸여야 레이저가 나오기 시작하는데, 이때 레이저가 발진되는 전압을 문턱 전압이라고 한다.

T10을 좀 더 보자, 1에서0으로 떨어지는 속도는 매우 빠르기 때문에 1번 준위는 거의 항상 비어있는 상태이다. 이런 상황에서 밀도 반전이 일어나려면, 2번 준위에 전자가 매우 조금만 들어와도 되므로 4준위 레이저는 3준위보다 문턱 값이 낮고, 이에 따른 발진이 훨씬 쉬운 편이다. 다만 레이저 레벨과 펌핑 레벨의 차이가 결국 레이저의 효율을 결정하게 되므로, 4준위에서는 에너지의 손실이 더 크고, 이 손실이 열의 형태기 때문에 열 문제가 나타나는 등의 현상이 관측된다.

지난 시간에는 레이저가 일어나기 위해 필요한 최소 조건들과, 레이저라는 개념이 어떻게 일어났는지에 대하여 다루어 보았다. 이에 이어서, 이번 시간에는 레이저의 기본 구조에 대한 이야기를 해 보도록 한다.

## 1. 레이저의 기본 구조

레이저의 기본 구조는 간단하다. 물질이 있고, 공진기를 이루어주는 두 거울이 있다. 밀도 반전을 일으키기 위해 여기에 펌핑 에너지를 가해주고, 자발 방출로 나오던 빛 중 방향성이 맞는 빛만이 살아남아 반사를 계속하게 된다. 이 빛들은 높은 준위의 원자를 건드려 유도 방출을 일으키게 되고, 어느 순간 유도 방출이 자발 방출보다 커지면서 레이저가 발진되게 된다. 이때 두 거울중 한 거울은 95% 또는 90% 반사 효율을 가지는 거울을 두어, 공진 구조로 생긴 레이저의 일부가 나올 수 있도록 만든다. 아래 그림은 이전에도 한번 보았던 레이저의 기본 구조이다.



<Figure 1 - 레이저 공진기의 구조>

### 1) 레이저 물질

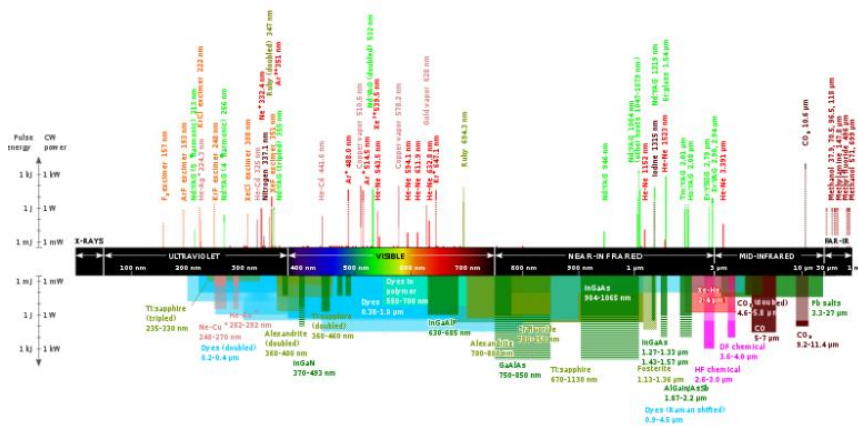
그러면, 레이저 물질로는 어떤 것을 쓸까? 이전에도 말했지만, 레이저 물질이 가져야 하는 조건들은 다양하다. 그 중에도 Sharp fluorescent lines 라는 것이 있는데, 이는



에너지 준위 band가 얼마나 좁게 되는가, 다시 말해 빛의 선폴이 얼마나 짧은가와 연관되는 인자이다. 레이저는 또 큰 흡수 및 형광 방출 계수를 지녀야 하는데, 레이저의 원리를 생각해보면 받아들이기 어렵지 않을 것이다. 레이저 물질은 또한 높은 양자 효율을 가져야 한다. 이때 말하는 양자 효율은, 들어가는 펌프 대비 나오는 레이저의 효율이 얼마인가, 즉 손실이 얼마나 일어나는지를 의미하며, 이 양자효율은 너무 높아서도 안된다.

레이저 물질의 구조는 레이저 전이를 일으키는 active ion과 이를 포용하는 host material로 이루어져 있다. 예를 들어, Nd:Yvo\_4에서는 Nd가 active ion, Yvo\_4는 host material이 된다. Host material로 주로 쓰이는 것들은 Yvo\_4 외에도 YAG, YLF, GGG, YAP, Glass 등이 더 있으며, 같은 active ion을 넣어줘도 host에 따라 생기는 빛의 특성들, 파장은 물론 편광의 상태까지 달라지곤 한다. 그렇기에 어떤 레이저를 어떤 방법으로 만들지에 따라 최적의 조합을 선택해서 만들 필요가 있다!

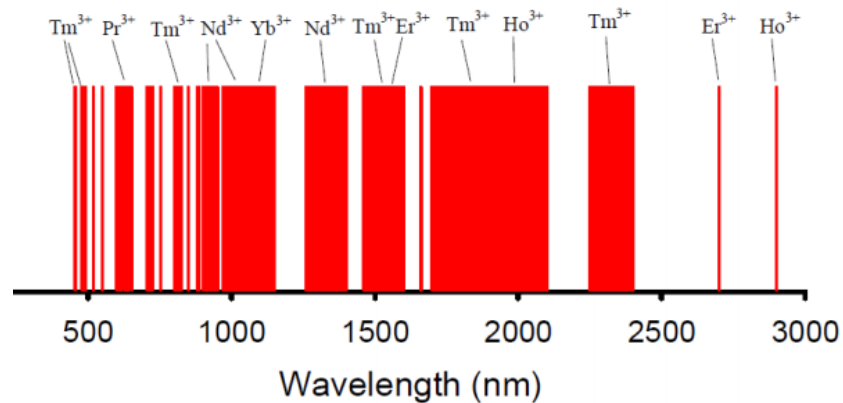
레이저로 만들 수 있는 물질이 정해져 있으며, 그들이 만드는 빛의 특성이 정해진다는 것은, 다시 말하자면 레이저의 발진 파장 또한 물질에 따라 이미 정해진 상태라고 볼 수 있다. 아래 그림은 물질에 따른 레이저 발진 파장을 나타낸 표이다



<Figure 2 – 레이저 발진 파장 표>

표를 보면 알 수 있겠지만, 레이저로 만들 수 있는 빛의 파장은 거의 제한적이다.

이 중에서도 광섬유 레이저로 만드는 파장을 따로 모아둔 표를 보도록 하자.

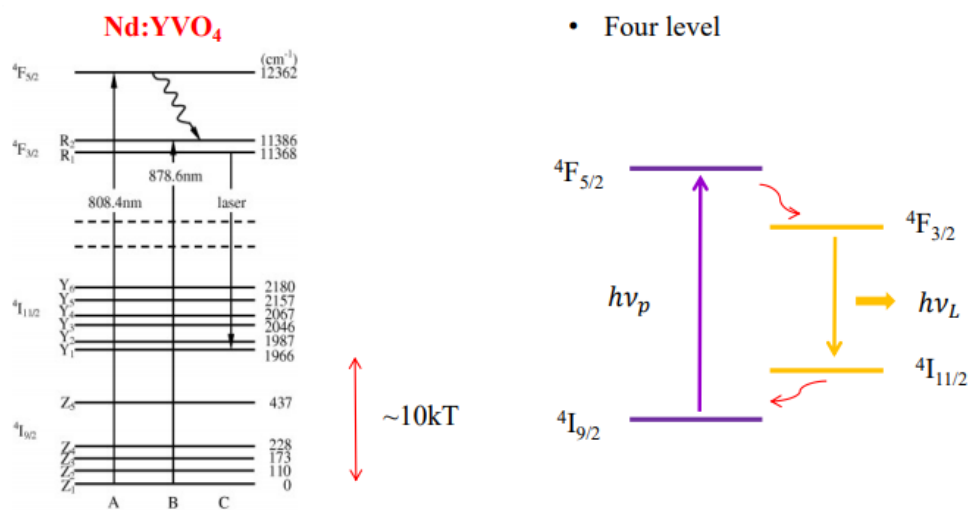


<Figure 3 – 광섬유 레이저 발진 파장>

Si host 광섬유는 주로 400~ 2100 nm 영역에 위치하고 있으며, 주로 쓰이는 Yb는 980~1200 nm, Er는 1530~1600nm이다. Silica는 약 1.5~1.6 um에서 흡수율이 매우 줄어들게 되므로, 해당 파장대로 레이저를 만들어야 손실률이 매우 줄어들것이다. 이 점을 알기 전까지는, 빛이 광 도파로를 따라 진행하면서 그 손실률이 너무나도 커 사용이 어려웠으나, 지금은 손실률 자체도 줄어든 상태에서 중간중간 Er을 이용한 증폭을 다시 이용하여 초장거리 광통신이 가능해졌다.

## 2) Nd 레이저

산업적 이용이 가능했던 최초의 레이저는 C2 였다. 이후 1970년대, 지금까지도 널리 쓰이는 Nd 레이저의 발명이 이루어졌다. 그러면 Nd 레이저는 어떤 장점이 있길래 가장 좋은 레이저가 된 것일까?

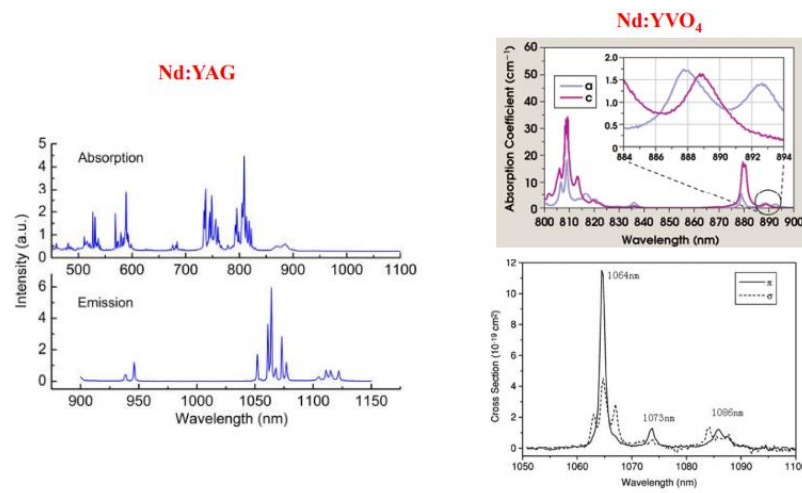


<Figure 4 – Nd 레이저의 다이어그램>

그림에서 볼 수 있듯, Nd는 4 레벨 레이저이다. 그렇기 때문에 레이저 발진이 잘 되며 이 점 때문에 펌핑의 방식을 다양하게, 심지어 태양빛 에너지도 펌핑의 소스로 쓸 수 있다. Nd를 이용한 대표적 물질은 Nd:YVO<sub>4</sub>와 Nd:YAG이다. YVO<sub>4</sub>는 선형적인 빛이 나오며 808nm를 이용하여 1064nm를 만드는 레이저이다. Lifetime은 약 100 us 정도이며, YAG는 230us, YLF는 480us이다. Nd 레벨의 이상적 손실, 양자 효율은 1에서 펌핑하는 808을 출력되는 1064로 나눈 값을 뺀 값, 약 0.25가 된다. 즉 Nd에 808nm를 넣어 1064nm를 만들 때 이상적인 효율은 75%가 나오며 25%는 열의 형태로 방출되는 것이다.

어떤 준위를 이용하냐에 따라 나오는 파장은 달라 질 수 있다. 열에너지에 의해 상온에서도 Low laser level에 전자가 존재할 수 있으며, 그 밀도가 높아지며 레이저 발진과 증폭에 영향을 주기도 한다. 이로 인해 파장이 달라 질 수 있는데, 이때 바뀌는 파장은 약 900nm 대로, 파장을 반으로 만들면 블루 레이저에 해당하는 대역이다.

이처럼, Nd라는 하나의 물질도 어떤 파장을 펌핑 소스로 사용하냐에 따라 나오는 파장이 달라지고 특성이 달라지므로, Nd 스펙트럼을 알아둬야 할 필요가 있다.

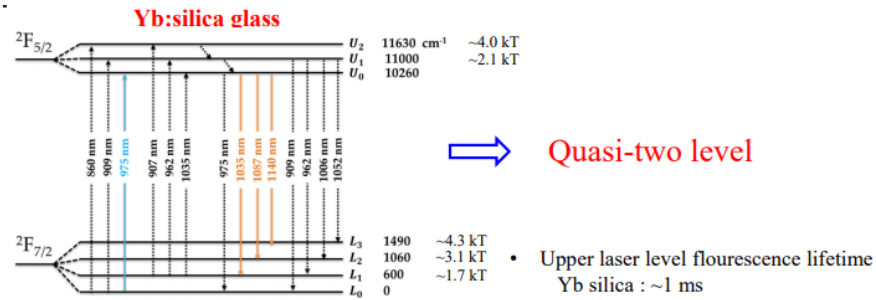


<Figure 5 - Nd 스펙트럼>

YAG는 편광되지 않은 빛이, YVO<sub>4</sub>는 편광된 빛이 나옴을 기억해두자!

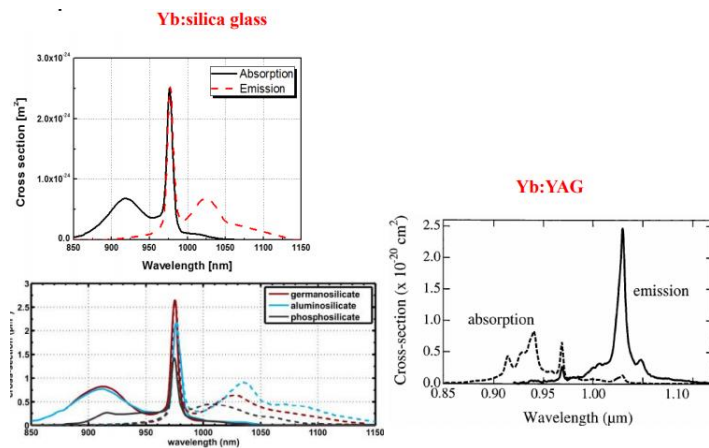
### 3) Yb 레이저

이터븀 레이저는 거의 2레벨 구조를 가지고 있는 레이저이다. 그렇기 때문에 레이저 발진이 매우 어렵다. 2레벨에 가까움에도 레이저 발진이 되는 이유는, 이터븀 레이저의 다이어그램을 보면 이해 할 수 있다.



<Figure 6 – YB 레이저 다이어그램>

이터븀 레이저는 거의 2준위처럼 구성 되어있지만, 사실은 여러 밴드들이 어느정도 미세한 차이를 가지고 좁게 붙어 있는 형태이다. 이 미세한 차이가 마치 3준위 레이저나 4준위 레이저처럼 작동해 밀도 반전에 도움을 주기에, 이터븀 레이저를 Quasi-two 레벨 구조라고 한다. 그렇다 하더라도 밀도 반전을 일으키기는 여전히 힘들기에 특정 파장, 특정 조건에서만 발진할 수 있지만 레이저 특성은 너무나도 좋은데, 이터븀의 lifetime은 1ms로 매우 길고 손실 또한 그 사이 폭이 매우 좁기 때문에 약 10~15%밖에 나오지 않는다. Nd가 손실률이 25%임을 생각 해보면, 열로 인한 물질의 특성 변이가 훨씬 덜 일어난다고 말할 수 있다. 이제 이터븀의 스펙트럼도 한번 살펴 보자.



<Figure 7 – Yb 스펙트럼>

이터븀 레이저는 주로 광섬유 레이저로 많이 쓰이게 되며, 좋은 효율 때문에 고출력에 하이브리드로 이용되는 레이저이다.

Nd와 Yb는 가장 많이 이용되는 두 레이저이다. 그러므로 이 두 레이저가 가지고 있는 장, 단점과 특성을 비교하여 기억해 뒀야 할 것이다. Nd와 Yb를 비교하는 표를 바로 다음 페이지에 가져왔다.

<Table 1 – Nd와 Yb 레이저 비교(1um 발진)>

	Nd	Yb
레이저 레벨	4 레벨	준 2 레벨
도핑 농도	<1%	수십 %의 고농도 가능
Fluorescent lifetime	100~500 $\mu$ s	~1 ms
Pumping/laser wavelength	808(880)nm/1064(1054) nm	915(976) nm/1030~1100 nm
이론적 기울기 효율	~75%	85~90%
양자결함 (열발생)	~25%	9~15%
재흡수	없다	있다
온도 의존도	거의 없다	민감함
적합한 레이저 형태	Rod, slab type Oscillator, Amplifier	Thin disk, Regen amplifier, Oscillator

#### 4) 기타 레이저

이 외에도 Er, Tm 레이저 등이 있다. Er은 통신용으로 자주 쓰는 레이저로 산업용과는 관련이 멀며 Er 단독으로는 흡수가 잘 안 일어나 고출력 레이저로 쓰기가 힘들어 보통은 Yb와 엮어서 사용한다. 특히 사향으로는 자율주행 자동차를 만들 때 쓰는 RADAR를 만들 때 쓴다. 이는 Yb가 산란에 대해 안정적이기 때문이다.

Tm은 다양한 펌핑 구조를 가지고 있으며, 발생 효율이 매우 높지만 출력이 매우 낮다. 산업적으로는 플라스틱 가공이나 마킹에 쓰곤 한다. 이 외에 Ho 레이저는 군사용이나 병원에서의 결석 제거를 위해 사용하며, 약 2um 정도의 레이저 파장을 가지고 있다. Ti 레이저는 전이금속 중에 가장 유명한 레이저로, 최초로 펄스 레이저를 구현한 물질이다. 매우 많은 분야에 쓰였으나 요즘은 Yb를 펄스 레이저로 이용 하며 Ti는 점점 쓰이지 않지만 발진 파장이 넓기에 다양한 분야에 응용하기가 좋아 여전히 많은 수요를 가지고 있다. Ti처럼 발진 파장이 넓은 레이저를 Tunable solid state laser 라고 하며, 이들은 모두 넓은 이득 섹터를 가져 펄스 레이저를 만드는데 적합하며 발진은 매우 매우 어렵다.