

# 레이저 MECHANIS의 MICROSCOPIC 해석과 레이저의 종류 및 응용 분야

金得泳 · 張根浩  
(금성전선 연구소)

## 차례

1. 서론
2. 레이저의 발진원리
3. 레이저 응용기술
4. 레이저 종류
5. 레이저 응용분야
6. 결론

## 1. 서론

레이저는 현재 급성장하고있는 광산업의 주역으로서 광산업의 이해는 레이저 빛의 특성과 레이저 발진원리의 이해 및 응용기술의 이해에 근간을 두어야할 것이다. 따라본 본 기고는 보다 이론적으로 알기쉽게 레이저빛의 본질적 특성의 원인분석과 레이저의 발진원리를 새로운 관점에서 설명하고 레이저 종류 및 기본 응용기술을 간단히 소개하고자 합니다.

레이저(Laser)는 1958년대의 최대관심사인 microwave의 parametric 증폭의 연구후에 많은 microwave 연구진이 microwave 대신 파장이 더짧은 증폭에 관심을 집중하여 얻어진 산물로서, 1958년 미국의 Bell Lab.의 Towns와 그의 의제 Shallow 또 거의 동시에 소련의 레베데프 Lab.의 Basev와 Prokhorov가 Laser 의 이론을 발표하고 마침내 1960년 6월 미국의 Hughes Aircraft사의 Maiman이 최초로 Ruby레이저를 발진시키었다. 이어 1960년 12월 Bell Lab.의 Javan이 He-Ne 레이저를, 1961년에 S-nitzer가 YAG레이저를, 1962년에 GaAs 반도체 레이저를, 1964년에 Bell Lab.의 patel이 CO<sub>2</sub> 레이저를 발진시키었다. 이어 지금까지 UV(Ultra Violet : 자외선)으로부터 FIR(Far Infrared : 원적외선)까지 넓은 영역에 걸쳐 연구가 계속되고 있으며 가속된 전자를 Toggler 에 의해 원운동화시킴으로서 얻어지는 빛을 증폭하는 자유전자 레이저가 근래 개발되었다.

## 2. 레이저의 발진원리

### 1) 레이저 빛의 특성

레이저는 빛의 증폭 mechanism을 의미하며 레이저에 의해서 만들어진 레이저빛은 다음과 같은 특성을 갖는다.

- a. 단색광(Monochromatic Light) : 순수한 하나의 파장의 빛으로만 구성됨.

b. 방향성 (Directionality) 와 지향성 (Directivity) : 빛이 전구나 형광등 처럼 사방으로 발산되지 않고 오직 하나의 방향으로만 발산하므로 방향성을 갖고 또 방출된 빛은 방향성에 입각하여 거의 퍼지지 않고 계속 유지 되므로서 지향성을 갖는다.

c. 가간섭성 (Coherence) : coherence의 개념은 일반적이지 않으나 간단히 말하면 두 wave의 위상차가 일정하게 유지되면 coherent하다고 하며, 특히 두 wave의 주파수가 같을때 coherence는 간섭 (interference)의 원인이 되며 중요한 개념이 된다.

2) 레이저의 근본 원리

a. Oscillation Mechanism

레이저 (Laser)는 Light Amplification by Stimulated Emission of Radistion의 축약어로서 레이저의 빛을 유도하는 source의 빛이 빛을 내는 mechanism ( : 여기된 원자나 분자)을 자극하여 source 빛과 같은 성격(동일한 주파수(파장), 동일한 방향)의 빛을 내도록 유도하여 빛을 증폭하는 mechanism을 의미한다. 따라서 이 mechanism의 이해는 곧 레이저 빛의 특성, 즉 단색성과 방향성 그리고 가간섭상의 이해와 직결된다.

일반적으로 빛을 내는 mechanism을 양자역학적 개념하에 그림 1 과 같이 원자나 분자가 에너지 준위간의 천이과정으로 설명한다.

가장 안정된 준위에 있을 때를 기저상태 (ground state ( $E_0$ ))라 하고 그이외의 상태를 여기상태 (excited state ( $E_1$ ))라 할때 여기상태에서 기저상태로 천이시 두 상태의 에너지차 ( $\Delta E = E_1 - E_0$ )에 해당하는 에너지를 빛으로 방출하며 빛의 주파수 ( $= \nu$ )는

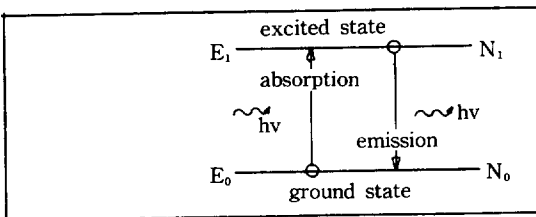


그림 1. 양자모델에서의 천이

$$\nu = \frac{E_1 - E_0}{h} \quad (h : \text{Planks' costant}) \quad (1)$$

로서 설명한다. 그러나 이 설명은 간단하나 천이의 mechanism을 정확히 기술하지 못하므로서 레이저 빛의 특성중 파동성, 단색성, 방향성, 그리고 가간섭성을 설명하지 못한다. 따라서 천이의 mechanism을 분석하여 레이저 빛의 특성을 설명하겠다.

먼저, 빛은 전자기파 (electromagnetic wave)로서 파(wave)이다. wave는 wave 발생 mechanism 으로부터 energy가 전파되는 흐름을 말하며, 이 wave의 발생 mechanism이 바로 연구대상인 oscillation mechanism이다.

따라서 wave의 성격은 oseillation 성격에 따라 좌우된다. 역시 전자기파도 발생 mechanism인 electrical charge의 oscillation에서 발생됨은 쉽게 이해될 것이다.<sup>5)</sup> 특히 electrical charge의 damping oscillation mechanism에서 발생하는 빛을 일반적인 빛으로 자발적 광(spontaneous light)라 하며 forced oscillation mechanism에서 발생하는 빛을 stimulated emission Light 또는 레이저 빛이라 한다.

특히 oscillation mechanism은 자유진동 (free oscillation), 감쇠진동 (damping oscillation), 강제진동 (forced oscillation)으로 분류되며 laser의 이해는 강제진동의 이해를 갖점으로 한다. 강제진동은 관성력항 ( $m d^2 \vec{X} / dt^2$ ) 감쇠항 ( $m \gamma d \vec{X} / dt$ ), 복원력항 ( $-k \vec{X}$ ) 그리고 driving forced signal 항 ( $\vec{F}_0 \cos \omega t$ )으로 구성된다.<sup>1)</sup>

$$m \ddot{\vec{X}} + m \gamma \dot{\vec{X}} + k \vec{X} = \vec{F}_0 \cos \omega t \quad (2)$$

$m$  : 질량

$\vec{X}$  : 변위 ( $\dot{\vec{X}}$  : 속도,  $\ddot{\vec{X}}$  : 가속도)

$\gamma$  : 에너지 감쇠 (decay) 상수

$k$  : 탄성계수

$\vec{F}_0$  : driving force

$\omega$  : drivtng signal의 주파수

해 (solution)는 다음과 같다.

$$\vec{X} = \frac{\vec{F}_0/m}{(\omega_0^2 - \omega^2) \cos \delta + \gamma \omega \sin \delta} \cos(\omega t - \delta) \quad (3)$$

( $\delta = \tan^{-1}(\gamma \omega / (\omega_0^2 - \omega^2))$ )

or

$$\vec{X} = \frac{\omega_0^2 - \omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2} \frac{\vec{F}_0}{m} \cos \omega t + \frac{\nu \omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2} \frac{\vec{F}_0}{m} \sin \omega t \quad (4)$$

해(3)을 해석하면

① X는 고유진동수  $\omega_0$ 로 진동하지 않고, driving signal의 주파수  $\omega$ 로 진동하므로 주파수가 통일되어

→ 단색성이 되고

② X는 벡터로  $F_0$ 의 벡터의 방향을 가지므로 통일되어

→ 방향성을 나타내고

③ X의 response는  $\delta$ 만큼 delay되어 위상차가 일정하게 유지되므로

→ 가간섭성을 나타낸다.

b. polarization

빛의 발생 mechanism인 천이를 근본적으로 해석하면 원자모델에서는 전자의 천이가 주요 요인이고 분자의 모델에서는 진동과 회전모드의 변화가 천이의 주요 요인이 된다. 천이는 전자 분포의 변이를 수반하는데 즉 polarization의 변화를 수반한다. polarization의 증가는 원자모델에서는 전자의 여기를 의미하고 분자모델에서는 보다 높은 주파수의 진동모드 또는 회전모드로의 여기를 의미하며 즉 에너지가 흡수된 상태임을 의미한다. 반대로 polarization의 감소는 낮은 에너지 상태로 변이됨을 의미하며 에너지의 방출을 나타낸다.

이때 polarization의 변화는 그림 1과 같이 translational 변화가 아니라 oscillation mechanism에 의해서 이루어진다. 이 때의 oscillation mechanism을 식(2)와 같이 구성하면 다음과 같다.

$$\ddot{\vec{P}} + \gamma \dot{\vec{P}} + \omega_{01}^2 \vec{P} = \frac{(N_0 - N_1)e^2}{m} \vec{E}_0 \cos \omega t \quad (5)$$

 $\vec{P}$ : polartzation $\omega_{01}$ :  $2\pi \Delta E/h$  (proper frequency) $N_0$ : 기저상태의 population (= 입자수/부피) $N_1$ : 여기상태의 population (= 입자수/부피)

-e: 전자의 전하

 $\vec{E}_0$ : driving signal (source 빛의 전기장)

m: 질량

이때 식(5)에서 driving signal이 없다면

$$\ddot{\vec{P}} + \gamma \dot{\vec{P}} + \omega_{01}^2 \vec{P} = 0 \quad (6)$$

이 되고 해는 해

$$P = \exp(-\gamma/2t) \cos \omega_1 t \quad (\omega_1^2 = \omega_{01}^2 - \gamma^2/4) \quad (7)$$

로 주어지며  $\omega_1$ 의 주파수로  $\gamma/2$ 로 감쇠하고 있음을 알수 있으며 이때 방출되는 wave는  $\omega_1$ 을 갖는 spontaneous emitted light가 된다. 이것이 일반적인 빛이다. 식(5)는 forced oscillation을 의미하며 해는 해(3)과 해(4)를 수정하면 다음과 같다.

$$\vec{P} = \frac{1}{(\omega_0^2 - \omega^2) \cos \delta + \gamma \omega \sin \delta} \frac{(N_0 - N_1)e^2}{m} \cdot \vec{E}_0 \cos(\omega t - \delta) \quad (8)$$

or

$$\vec{P} = \frac{\omega_0^2 - \omega^2 (N_0 - N_1)}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2} \frac{\vec{E}_0}{m} \cos \omega t + \frac{\nu \omega (N_0 - N_1)}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2} \frac{\vec{E}_0}{m} \sin \omega t \quad (9)$$

해(8)을 해석하면 해(3)의 해석 때와 같다. 즉 단색성, 방향성, 그리고 coherence을 보여준다. 따라서 laser의 주요 mechanism을 이해했다고 볼수 있다. 이어 식(5)와 해(9)를 좀더 분석하여 보자.

즉 mechism의 energy interaction양을 계산해보면<sup>2)</sup>

$$\langle E \rangle = \int_0^T P \cdot E dt \quad (10)$$

$$= \frac{1}{2} \frac{(N_0 - N_1)e^2}{m} \frac{\gamma \omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2} \cdot \omega |E|^2 \quad (11)$$

해(11)을 분석하면 에너지의 흡수 및 방출을 의미하는데 이는 해(3)중 오직 sin항과 관계 있음

을 주의해야 한다. 해(11)에서  $N_0 > N_1$  이면 에너지 흡수를 의미하고  $N_0 < N_1$  이면 방출을 의미하며  $N_0 < N_1$ 의 조건을 밀도반전 (population inversion)이라 하며 레이저의 기본 조건이 된다. 그리고  $N_0 < N_1$  이때 해(11)을  $g(\omega) \omega I E I^2$  으로 고칠 때  $g(\omega)$ 을 gain이라 하며  $\omega$ 에 따른 분포는 Lorentzian 분포를 가지며 gain profile 이라 하고 그림 2와 같다. 특히 이때 gain profile의 FWHM (full width at half maximum)은 감쇠상수 ( $\gamma$ )가 됨에 주의해야 한다.

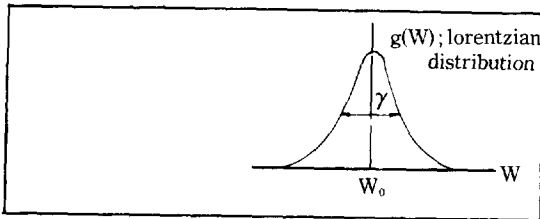


그림 2. 밀도반전시 이득곡선

c. standing wave와 resonator

해(11)에서 보면 interaction energy 양은  $I E I^2$  즉 source 빛의 intensity (강도)에 따라 비례하므로  $I E I^2$ 의 값을 크게 해야 한다. 그러려면 E의 에너지를 저장해서 크게 해야 된다. 이때 저장된 E는 wave로서 전진진행파와 후진진행파가 겹쳐지게 되는데 만약 서로 위상이 다르며 superposition시 E의 값이 서로 상쇄하여 감소하고 만약  $180^\circ$  다르며 완전히 상쇄 소멸된다. 따라서 이때 완전히 상쇄되지 않고 보존될 수 있는 경우는 서로 위상이 같을 때이며 위상 ( $\phi$ )이 같으면 다음과 같이

$$\begin{aligned} \psi^\phi &= \psi^f + \psi^b \\ &= A \exp\{i(\vec{k} \cdot \vec{x} - (\omega t + \phi))\} + A \exp\{i(\vec{k} \cdot \vec{x} + (\omega t + \phi))\} \\ &= 2A \exp\{i(\vec{k} \cdot \vec{x})\} \cos(\omega t + \phi) \end{aligned} \quad (12)$$

( $\psi^f$ : standing wave,  $\psi^f$ : forward travelling wave,  $\psi^b$ : backward travelling wave)

시간항과 공간항이 독립적으로 나타나는데 이 합성파를 standing wave라 하고 저장이 가능한 wave form이 되고 이때 저장 volume을 resn-

ator라 한다. 이때 standing wave의 주파수 ( $\omega_s$ )는 boundary condition에 의해

$$\begin{aligned} \omega_s &= n \cdot 2\pi(c/2L) \quad (n: \text{양의 정수}) \\ c &: \text{빛의 속도} \\ L &: \text{resonator의 길이} \\ \nu_0 &: (=c/2L) \end{aligned} \quad (13)$$

으로 주어지며 resonator안에서는 오직  $\omega_s$ 의 주파수를 갖는 driving signal만이 살아 남는다. 결국  $\omega_s$ 들만이 레이저 mechanism의 stimulated signal된다. 그래서 gain profile 안에서  $\omega_s$ 들만이 lasing되며 이때  $\omega_s$ 들의 발진상황을 laser (longitudinal or transverse) 모드라 한다.

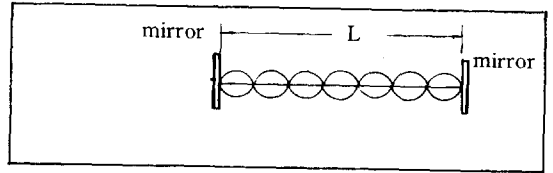


그림 3. 공진기 내부의 정상파

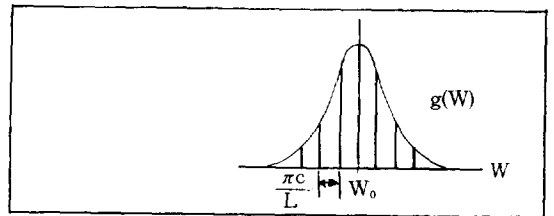


그림 4. 발진모드와 모드간격

d. gain과 loss

gain medium이 gain을 가지고 있고 resonator에서 외부로 output을 내면 output 만큼의 loss가 존재하므로 레이저 발진 조건은 gain이 loss보다 커야 발진이 시작되며 곧 gain이 포화되어 loss와 같아지는데 이때를 steady state의 레이저 발진이라 하며 이때의 gain을 포화이득 (saturated gain)이라 하고 다음과 같이 주어진다.

$$g = \frac{g_0}{1 + I/I_s} \quad (14)$$

$g$ : saturated gain

$g_0$  : unsaturated gain (driving signal이 없고 pumping만 할때 gain)

$I$  :  $|E|^2$  (공진기 내부의 광의 강도)

$I_s$  : saturated gain ( $N_1 = 2 \times N_2$  일때의  $|E|^2$ )

이때  $g_0 - g$ 의 값은 resonator의 output와 비례 관계를 가지고 관련되므로 중요한 값이다.

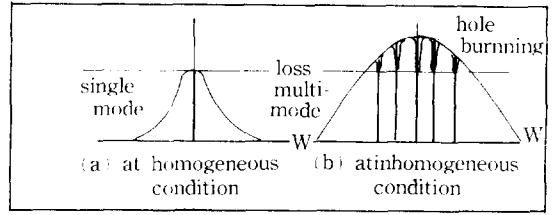


그림 6. (a) Homogeneous 조건과 (b) Inhomogeneous 조건에서의 발진모드수

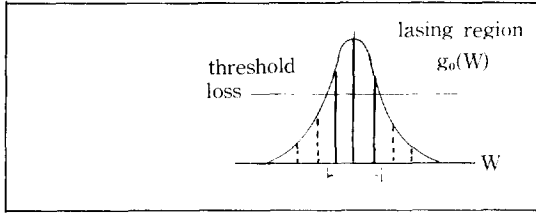


그림 5. 이득과 발진조건

는 gain profile이 여러개 겹치지며 합성 gain profile에서는 여러개의 axial모드가 발진한다. 이때 gain profile에서  $\omega_s$  주위만 gain이 포화되어 profile에 Hole이 발생되는데 이를 Hole burning이라 한다.<sup>3)</sup>

e. Homogeneous condition/Inhomogeneous condition

active medium이 homogeneous 상태 ( $\omega_0$  가 하나일때)이면 오직 하나의 axial 모드만이 gain=loss상태가 되어 하나의 axial 모드만이 발진하고, inhomogeneous 상태 ( $\omega_0$  가 여러개 일때)

3. 레이저 종류

레이저의 종류는 active medium의 host material의 상태에 따라 기체 레이저, 액체 레이저, 고체 레이저로 나누고 천이에 따라 원자천이,

표 1. 레이저의 종류

type	종 류	파 장	천 이	pumping	주요응용분야
기 체	He-Ne	632.8nm	원 자	방 전	spectrascopy
	Ar	488, 514.5nm			"
	N <sup>2</sup>	337nm			
	eximer (ArF)	193nm	"	"	material processing
	eximer (KrF)	249nm			
	eximer (XeF)	350nm			
	CO <sub>2</sub>	9.6, 10.6um	진동 및 회전		"
액 체	dye	300~1000nm	원 자 레이저		spectrascopy
고 체	Ruby	694nm	원 자	lamp	material processing
	Nd : YAG	1.064um		"	"
	Nd : glass	1.06um			
	F-center	1.43~1.58um	"	레이저	spectrascopy
	알렉산드라이트	2.3~3.5um			lamp
반 도 체	GaAlAs	750~905nm	전자+홀	전 류	광통신
	In	composition dependent			"
	InGaAsP	1.1~1.6um c-d	"	"	"
전 자	free electron	X ray~IR	곡선운동	자기장	lithography

분자의 진동모드천이, 회전천이 레이저로 나누고 또, 파장에 따라 분류하며, pumping 방법에 따라 표1과 같이 분류한다.

- mirror
- b. reflecting (반사) : mirror, prism, corner cube
- c. scanning : multi-plane mirror 회전

### 4. 레이저 응용기술

#### 1) 굴절 기술

- a. focussing (빔) : 볼록렌즈 이용
- b. expanding (넓힘) : 오목렌즈 이용
- c. collimating : afocal unit 이용

#### 2) 반사기술

- a. dividing (나눔) : partial reflection

#### 3) 변조 기술

##### a. AM 기술

- Acousto-optic modulation
- Electro-optic modulation
- Magneto-optic modulation

##### b. FM

- Electro-optic modulation

### 5. 레이저 응용분야

종류	He-Ne 레이저	Ar 레이저	CO <sub>2</sub> 레이저	Ruby 레이저	유리 레이저	YAG 레이저	반도체 레이저
주요파장	0.6328um (red) 1.15um (IR)	0.4880um (blue) 0.5145um (green)	10.6 um (IR)	0.6943um (red)	1.06um (IR)	1.064um (IR)	0.75~0.9um (NIR) 1.1~1.6um (NIR)
특징	•안정한 cw •low power •portable	•안정한 cw •medium 출력 •high coherent	•high efficiency •high power •cw or pulse	•고출력 pulse •Q-switch	•고출력 pulse •Q-switch	•cw or pulse •Q-switch •compact	•high efficiency •small
토목측정	조준기 분광분석 정밀측정	라만분극 유속계 holograpy	유속계 대기오염감시	측거 비선형 광학계측 holograpy		레이저레이다	측거
계측	유속계 결합 검출 평면도측정 holograpy						
정보처리	FAX OCR printer POS video disc memory	memory printer copy					OCR printer memory video
통신	공중전파통신 안저검사 혈액검사	수중 통신 코어클레이터 피부치료	레이저 매스	코어클레이터 holographic 진단		레이저 매스	광섬유통신
에너지			핵 융합	프라즈마계측 drilling	핵 융합 drilling welding		
가공		IC마스크가공 disc 원반제작	cutting welding drilling heat treatment ceramic 가공			scribing trimming mask repairing marking drilling, weldinf	
기타	display	display					

## 6. 결 론

레이저의 빛의 특성(단색성, 방향성과 지향성, 가간섭성)의 이해를 돕고자 미시적 및 거시적으로 빛의 발생 mechanism을 접근하여 본질적 상황을 설명하여 보았다. 레이저 mechanism이 electrical charge의 변이 즉 polarization의 forced oscillation mechanism임을 보이고 이어 미시적 관점의 발생 mechanism과 거시적 관점의 resonator와의 관계로 모드의 발생을 설명하고 homogeneous와 inhomogeneous condition상황시 모드의 분포를 설명하므로써 레이저의 발진조건 시 상황을 설명하였다. 이어 간단한 레이저 빛의 조작기술과 레이저 종류 및 응용분야를 간략 소개 하였다.

## reference

- 1) J.B. Marion, Classical dynamics of particles and systems, 2nd ed., academic press 1970, p.118
- 2) A.F. Siegman, Introduction to laser and maser, McGrawhill 1971, p.62
- 3) J.T. Verdeyen, laser electronics, Prentice-hill 1982
- 4) G.R. Fowles, Introduction to modern optics, Holt-rinehart and Winston 1968, p.244
- 5) J.R. Reitz F.J. Milford and R.W. Christy, Foundations of electric magnetic 3ed, Addison-Wesley 1978, p.459