

레이저

—미래를 개척하는 마법의 광선—

글/강 형 부(한양대학교 전기공학과 교수·공학박사)

1. 서 론

레이저라는 전혀 새로운 광선이 방사된 것은 1960년의 일이었다. 그 후 약 30년의 세월을 거쳐 레이저는 현재 과학기술의 모든 분야에서 없어서는 안 될 만큼 발달되었다. 레이저는 발명 당시 “마법의 광선”이라 하여 큰 화제를 불러일으킨 바 있었으며 반도체와 더불어 금세기 최대의 발명이라 일컬어지는 레이저는 그에 걸맞는 큰 가능성을 지니고 있다. 환상적인 3차원의 영상(Image)을 구현하는 홀로그램(Hologram), 레이저 디스크, 레이저 프린터, 광통신, 레이저 정밀계측, 물질의 가공, 외과 수술용 레이저 매스, 우라늄 농축 등 많은 분야에 폭 넓게 이용되고 있으며 최근에는 인류의 새로운 에너지자원인 되는 핵융합 연구에도 이용되고 있다.

레이저(Laser)란 말은 레이저 광선을 발생하는 원리인 “유도방출에 의한 광의 증폭”이란 의미인 “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”의 각 단어의 첫 문자를 따서 만들어진 것이다.

레이저 광선은 보통 광선에 비해 코히어런스(Coherence)가 매우 우수하다고 한다. 이에 관한 자세한 내용은 4절에서 설명하기로 하고 우선 레이저의 역사와 현황 및 레이저의 원리를 간단히 살펴보기로 한다.

2. 레이저의 역사와 현황

전자관을 사용하여 마이크로파를 발생시키는 것은 마이크로파의 파장이 짧을수록 더욱 어렵게 된다.

이 어려움을 타개하는 획기적인 방법은 전자 대신 원자 또는 분자를 이용하는 방법이다. 이와 같은 착상에 의해 1954년에 미국의 타운즈(Townes)는 고진공중에 분출하는 암모니아 분자에서 에너지가 높은 분자만을 선택함으로써 파장 1.25cm인 마이크로파를 발생시키는 발진기를 만드는데 성공하였다. 그는 이러한 발진장치를 분자발진기(Molecular Oscillator) 또는 메이저(Maser)라 명명하였다.

전자관 발진기에서는 회로의 공진에 의해 발진과장이 결정되는 데 비해 메이저에서는 분자의 공명(공진)에 의해 파장이 결정된다. 1mm 이하의 작은 공진회로를 만드는 것은 매우 어렵기 때문에 전자관으로 파장 1mm 이하의 전파를 발생시키는 것은 불가능하다. 그러나 원자와 분자의 공명은 파장이 매우 짧은 적외선 영역에서도, 또한 파장이 1 μ m 이하인 가시광선과 자외선 영역에서도 상당히 가능하므로 메이저의 원리를 이용하면 광파(Optical Wave)도 발생시킬 수 있을 것이다. 이러한 착상으로 당시 광메이저(즉, 레이저)의 개발연구가 매우 활발하게 전개되었다. 그 결과 1960년에 미국의 메이먼(Maiman)이 사상 처음으로 루비 결정을 이용하여 파장 6943 \AA , 최대출력 약 5kW인 적색 레이저 광선을 발생하는데 성공하였다. 이어서 미국의 재반(Javan)이 헬륨(He)과 네온(Ne)의 혼합기체방전을 이용하여 파장 1.153 μ m, 출력 약 15mW인 He-Ne 레이저 발진에 성공하였다. 이 He-Ne 레이저는 가시광선인 6328 \AA (적색)의 파장을 갖는, 보다 실용적인 레이저로 개발되어 널리 사용되고 있다.

그 후 네오디뮴(Nd)을 불순물로 함유하는 글라스

및 야그(YAG)결정을 이용한 고체 레이저가 개발되었고, 또 알곤(Ar), 크세논(Xe) 등의 희귀 가스, 질소(N₂), 탄산가스(CO₂), 물증기(H₂O), 수소(H₂) 등을 각각 이용한 기체 레이저가 잇달아 개발되었다. 특히 Nd 글라스 레이저와 CO₂ 레이저는 TW(10¹²W) 이상의 대출력과 10~100kJ의 출력 에너지를 발생시킬 수 있어서 대출력 레이저로서 매우 중요하다.

1962년에는 광통신에 획기적인 발전을 가져온 반도체 레이저의 발진이 성공하였고 또 라만(Raman) 레이저 작용도 발견되었다. 색소(Dye)를 알콜 등의 용매에 용해시킨 액체를 사용하는 색소 레이저는 1966년 발진에 성공하였다. 이 색소 레이저는 고체 및 기체 레이저와는 달리 발진 파장을 넓은 범위에 걸쳐서 변화시킬 수 있으므로 매우 넓은 응용분야를 갖고 있다.

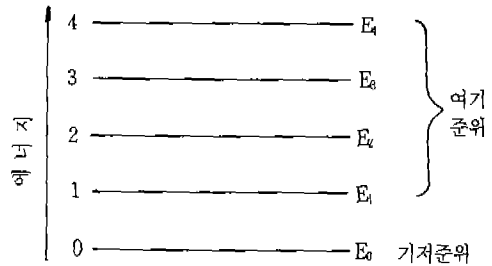
3. 레이저의 원리

3.1 자연방출과 유도방출

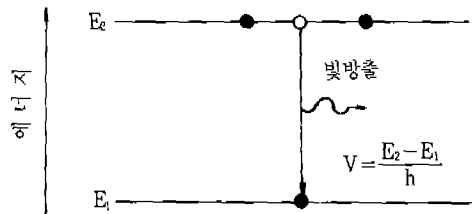
태양의 빛을 프리즘에 통과시키면 일곱가지 색으로 분해된다는 것은 누구나 잘 아는 사실이다. 이 일곱가지 색의 빛은 연속적으로 색조가 변화하는 부분과 균등군데에 선 모양으로 빛나는 부분으로 이루어져 있다. 전자는 연속 스펙트럼(Spectrum), 후자는 선 스펙트럼이라 한다. 많은 사람들이 연구에 의하여 원소들은 각각 특정한 선 스펙트럼을 방출하고 이와 반대로 특정한 선 스펙트럼을 방출하는 원소의 증거는 그 선 스펙트럼을 잘 흡수한다는 사실이 알려지고 있다. 이와 같은 사실은 모든 원자 또는 분자가 연속적인 에너지를 지닐 수 없으며 비연속적인 에너지만을 지니고 있다는 것을 의미한다. <그림 1>과 같이 비연속적인 에너지를 에너지 준위라 하며 에너지가 가장 낮은 상태를 기저상태(Ground State), 그 보다 높은 에너지 준위를 여기상태(Excited State)라 한다.

선 스펙트럼의 방출 및 흡수는 이러한 에너지 준

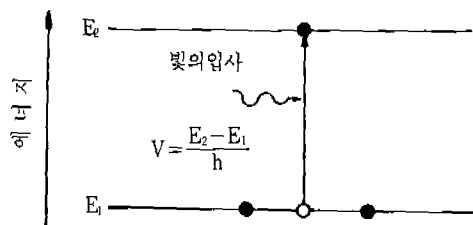
위간의 천이(遷移)로 인하여 일어난다. 즉 <그림 2>와 같이 가령 에너지 준위 E₂의 여기상태에 있는 원자가 낮은 에너지 E₁의 상태에 천이한다고 하면, $\nu = (E_2 - E_1) / h$ 의 주파수를 갖는 빛(광자)을 방출한다. 단, $h = 6.625 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{sec}$ 는 플랑크 상수이다. 이와 같이 높은 에너지 준위에 있는 원자가 그 준위의 수명(Lifetime)으로 결정되는 어떤 시간이 경과하면 저절로 ν 의 주파수를 가진 빛을 방출하면서 낮은 에너지 준위에 천이하는 현상을 자연방출(Spontaneous Emission)이라 한다. 반대로 ν 의 주파수를 갖는 빛이 입사하면 <그림 3>과 같이 낮은 에너지 준위 E₁에 있는 원자는 그 빛이 에너지를 흡수하



<그림 1> 원자계의 에너지 준위



<그림 2> 원자의 에너지와 방출되는 빛의 주파수 ν 와의 관계



<그림 3> 원자의 에너지와 흡수되는 빛의 주파수 ν 와의 관계

여 높은 에너지 준위 E_2 에 천이한다.

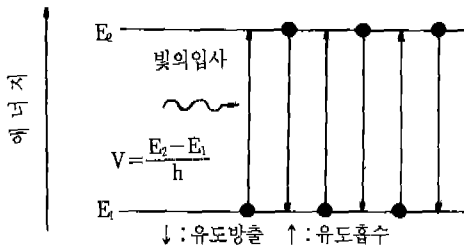
그런데 1917년에 아인슈타인(Einstein)은 높은 에너지 준위 E_2 에 있는 원자들은 자연방출을 일으킬 뿐만 아니라 주파수 ν 를 갖는 빛이 외부로부터 입사할 경우에는 그와 공명하여 매우 빠른 속도로 낮은 에너지 준위 E_1 에 천이하면서 같은 주파수의 빛을 방출하며, 한편 낮은 에너지 준위 E_1 에 있는 원자도 동시에 입사광을 흡수하여 높은 에너지 준위 E_2 에 천이하고 또 흡수와 방출이 같은 확률로 일어난다는 것을 발견하였다. 이 개념을 <그림 4>에 나타낸다. 이와 같이 외부에서 들어온 빛에 의해 자극되어 일어나는 천이를 유도천이(Induced Transition)라 하며, 특히 빛을 방출하는 천이를 유도방출(Induced Emission), 흡수하는 천이를 유도흡수(Induced Absorption)라 한다.

3.2 반전분포

1960년에 레이저 발진이 성공될 때까지는 레이저를 실현하는 것은 원리적으로 불가능하다고 생각한 사람이 많았다. 왜냐하면 유도방출과 유도흡수가 동시에 같은 확률로 일어나며, 또 열역학에 의하면 유도방출보다 유도흡수가 반드시 세계 되기 때문이다. 지금 <그림 4>에서 에너지 준위 E_1, E_2 에 있는 원자수를 각각 N_1, N_2 라 하면 N_1, N_2 는 볼츠만 분포측에 의하여 각각 다음 식으로 주어진다. 즉,

$$N_1 = N \exp(-E_1/kT) \dots\dots\dots(1)$$

$$N_2 = N \exp(-E_2/kT)$$

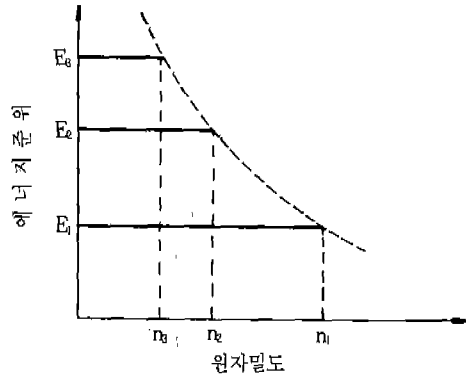


<그림 4> 유도방출과 유도흡수

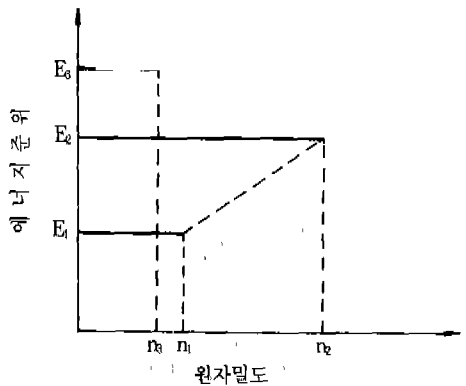
따라서

$$N_1/N_2 = \exp[(E_1 - E_2)/kT] \dots\dots\dots(2)$$

식 (2)에서 $E_2 > E_1$ 이므로 열평형상태에서는 반드시 $N_1 > N_2$ 가 되며, 유도방출과 흡수가 같은 확률로 일어난다는 것을 생각하면 흡수가 방출보다 더 세계되어 결과적으로 흡수만 하게 되므로 입사광은 감쇄한다. 이러한 상태에서는 빛의 증폭, 즉 레이저 작용을 일으킬 수 없다. 레이저를 실현시키기 위해서는 에너지 준위 E_1, E_2 사이에서 열평형상태를 파괴시켜 $N_2 > N_1$ 의 상태를 인위적으로 만들어 주어야 한다. 이 $N_2 > N_1$ 의 조건을 반전분포조건이라 한다. 이 열평형조건과 반전분포조건을 <그림 5>의 (a),



(a) 열평형 상태



(b) 반전분포상태

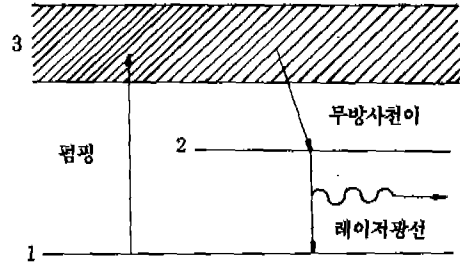
<그림 5> 열평형상태와 반전분포상태의 원자 및 도의 분포

(b)에 나타낸다. 반전분포조건에서는 $N_2 > N_1$ 이므로 유도방출이 유도흡수보다 더 세게 되며, 결국 입사광은 증폭된다.

$N_2 > N_1$ 일 때와 $N_2 < N_1$ 일 때의 입사광이 증폭 및 감쇄되는 모양을 <그림 6>에 표시하였다.

그러면 반전분포조건을 어떻게 해서 실현하는가를 루비 레이저를 예로 들어 생각해 본다. 루비는 산화알루미늄(Al_2O_3) 결정에 소량의 크롬이온(Cr^{3+})을 불순물로 함유시킨 것이다. 이 크롬이온의 에너지 준위를 <그림 7>에 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 가장 낮은 에너지 준위 1위에 폭넓은 에너지대 3이 있으며 그 중간에 에너지 준위 2가 있다. 준위 1, 2 사이에 어떻게 해서 반전분포조건을 이루는가를 설명한다.

원래 루비 결정은 열평형상태에 있으므로 크롬이온의 수는 $N_1 > N_2$ 가 된다. 이 상태에서 준위1과 준위3 사이의 에너지차에 해당하는 에너지를 갖는 광자(Photon)로 이루어진 강력한 빛을 루비 결정에 쬐이면 이 빛을 흡수하여 준위1에 있던 크롬이온의 대부분은 준위3으로 여기된다. 이와 같이 낮은 준위에 있는 이온을 높은 에너지 준위로 올려주는 작용을 펌핑(Pumping)이라 하며, 루비 레이저의 경우

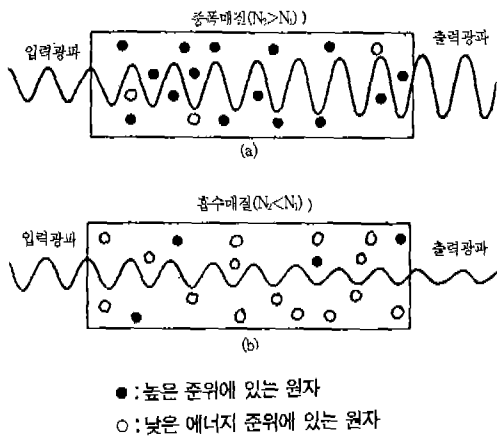


<그림 7> 루비 레이저 중의 크롬 이온의 에너지 준위와 작용의 모델(펌핑에 의해 준위1-2사이에 반전분포조건이 이루어진다)

는 강력한 Xe 플래시 램프에 의해 펌핑을 한다. 이 때 준위1은 거의 빈 상태가 되며, 준위3에 여기된 크롬이온은 빛을 방출하지 않고 준위2에 천이한다. 이온이 준위2에 머무는 시간을 여기준위2의 수명이라 하는데 이 수명은 상당히 길며, 따라서 이 시간 사이에 점점 준위2에 이온이 축적된다. 이때 준위1은 이온이 거의 없는 상태이고 준위2에는 많은 이온이 축적되므로 높은 준위2에 있는 이온수가 낮은 준위1에 있는 이온수보다 훨씬 많은 상태, 즉 준위1, 2사이에 반전분포조건($N_2 > N_1$)이 이루어진다.

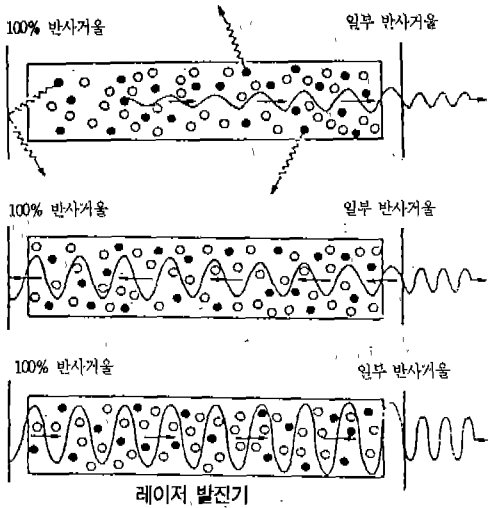
3.3 레이저 발전기

이와 같이 반전분포조건이 이루어지면 레이저의 발전과 증폭을 일으키는 것은 간단한 일이다. 발전을 예로 들면 <그림 8>에 표시한 바와 같이 두 개의 반사거울로 만들어진 광공진기(Optical Resonator)에 루비와 같은 레이저 매질을 배치하면 된다. 루비와 같은 레이저 매질에 플래시 램프에 의해 빛을 쬐어서 펌핑하여 반전분포를 만들어 주면, 자연방출로 인하여 생긴 빛은 반사거울 사이를 무수히 왕복하면서 유도방출을 일으켜서 빛은 눈사태처럼 점점 증폭되어 공진기 내부에는 강력한 빛이 발생한다. 이와 같은 상태를 레이저 발전이라 하는데 이 빛은 일부 반사거울을 통해서 외부에 방출된다. 이것이 레이저 광선이다. 기저상태에 있는 원자를 높은 에너지 준위로 올려주는 펌핑법에는 광에너지 뿐만 아니라 전기 에너지, 화학반응 에너지 등 여러

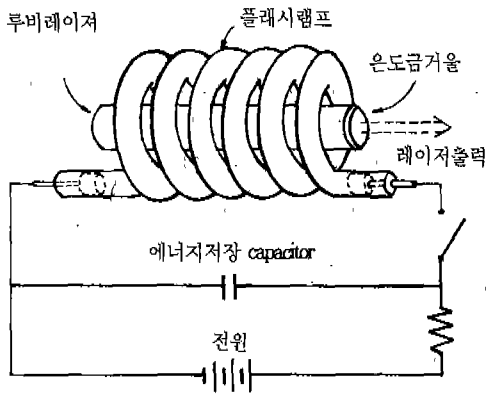


<그림 6> 반전분포조건(a)에서는 광이 증폭되고 열평형상태(b)에서는 광이 감쇄된다.

가지가 있다. 루비 레이저 발전기의 구성 및 주요부품을 <그림 9>에 나타내었다.



<그림 8> 레이저광이 축방향으로 나오는 과정



<그림 9> 펄스형 루비 레이저 발전기의 주요부품들

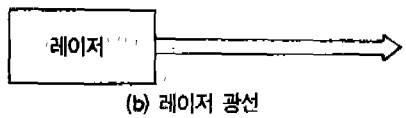
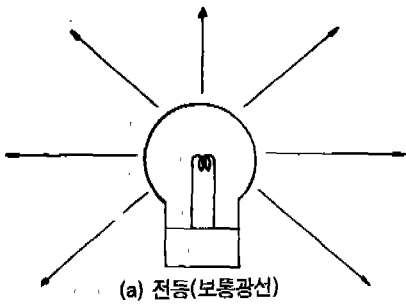
4. 레이저의 특징

레이저 광선을 본 사람이면 누구든지 맨 먼저 느끼는 것은 레이저 광선이 거의 퍼지지 않고 가는 빔(Beam) 상태로 직진한다는 점이다. 즉 레이저 광선은 지향성이 매우 우수한 특징을 지니고 있다. 광선이 직진한다는 것은 옛날부터 잘 알려진 사실이지만

형광등, 전등 등에서 나오는 보통 광선은 <그림 10>의 (a)에서 보는 바와 같이 사방팔방으로 퍼져나간다. 종전의 광선과는 달리 레이저의 이와 같은 우같이 한 방향에 직선적으로 진행한다.

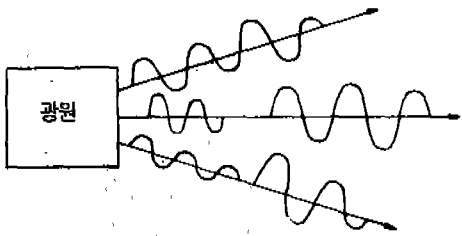
레이저 광선은 거의 완전한 평행 광선이고 또 후술하는 바와 같이 단색성이 매우 우수하기 때문에 렌즈로 집속시키면 보통 광선보다 훨씬 작은 점에 집중시킬 수 있다. 예를 들어 레이저광은 $10(\mu\text{m})^2$ 정도로 집속시킬 수 있으며 10W의 레이저 광선의 경우 $10^{12}\text{W}/\text{m}^2$ 정도의 큰 레이저 강도가 된다. 이것은 지상에서의 햇빛의 1000만배 이상이 되는 강도이다. 또 모드 동기(Mode Locking)란 레이저 기술을 이용하면 100만분의 1초의 100만분의 1이란 매우 짧은 시간(10^{-12} 초)내에 레이저 광선을 발사시킬 수 있는데 가령 레이저 출력 에너지가 1J이라 하면 레이저 출력은 10^{12}W 가 된다. 여기서 10^{-12} 초가 어느 정도 짧은 시간인가를 살펴보면 매초 30만km를 달리는 빛이라 하더라도 10^{-12} 초 사이에는 불과 0.3mm밖에 진행하지 않을 정도이다. 따라서 레이저 광선의 두번째 특징은 공간적, 시간적 에너지 집중성이 엄청나게 크다는 것이다.

이외의 더욱 중요한 레이저 광선의 특징은 그 단색성과 파동으로서의 위상의 규칙성에 있다. 태양과 전등 등에서 나오는 보통 광선은 프리즘을 통해서 보면 적색, 오렌지색, 황색, 녹색, 청색, 보라색 등의 스펙트럼으로 나누어진다. 즉 보통광선은 여러 주파수(파장)의 광선이 혼합된 광선이다. 그리고 보통 광선의 위상은 <그림 11>에서 보는 바와 같이 매우 불규칙하게 되어 있으며 또한 토막토막 잘려진 상태로 되어 있다. 이에 대하여 레이저 광선은 프리즘을 통해서도 나누어지지 않고 단 하나의 색뿐이다. 즉 단색성이 매우 우수하다. 또한 레이저 광선은 <그림 12>에서 보는 바와 같이 단일 주파수의 빛이 규칙적인 위상으로 진행하며, 그 길이도 매우 길다는 것을 알 수 있다. 이러한 레이저의 특성은 코히어런스(Coherence)가 우수하다고 말하며 결국 이 말은 빛의 간섭성이 매우 우수하다는 것과 같은 뜻

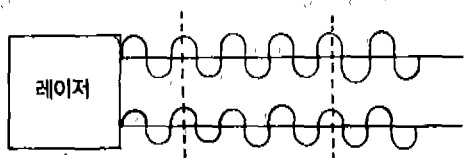


(a) 모든 방향에 퍼져나간다.
 (b) 한 방향에만 직진한다.

<그림 10> 보통광선과 레이저 광선의 차이



<그림 11> 보통광선의 주파수 위상은 매우 불규칙하며 토막광선이다



<그림 12> 레이저 광선은 단일 주파수이며, 그 위상도 매우 규칙적이다

이다. 종전의 광선과는 달리 레이저의 이와 같은 우수한 특성은 이미 넓은 과학기술 및 공업기술 분야에서 이용되고 있으며 앞으로도 계속해서 새로운 응용기술이 개발될 것이다.

5. 레이저의 종류

현재 널리 사용되고 있는 레이저는 고체, 기체, 액체 및 반도체 레이저 등으로 분류할 수 있다. 이들과 각 레이저의 종류 및 특성을 <표 1>에 표시한다. 각 레이저에 대해 간단히 설명하기로 한다.

(1) 고체 레이저

고체 레이저에서는 파장범위 0.6~2.6 μm , 지향성 $10^{-2}\sim 10^{-3}\text{rad}$ 정도의 여러 종류의 레이저가 있다. 고체 레이저의 특징으로는 우선 고출력을 들 수 있는데, YAG 레이저에서 연속출력 수백 W 인 것이 개발되고 있으며, 루비 및 글라스 레이저에서는 펄스출력으로 각각 10W 및 10^{13}W 인 대출력 레이저가 있다.

고체 레이저 재료는 광 펌핑에 의해 발광하는 원자(발광중심)를 함유하는 형광체라야 하는데, 발광 중심이 되는 활성이온을 결정에 도핑한 것과 비정질의 유리(글라스)나 플라스틱에 도핑한 것이 있다. 현재까지 레이저 발전에 성공한 활성이온에는 여러 가지가 있으나 주로 Cr^{3+} 및 Nd^{3+} 등이 사용된다.

루비 레이저는 Al_2O_3 결정에 0.005%의 Cr_2O_3 를 도핑한 것(소위 루비)을 레이저 재료로 사용하는 것이며, Cr^{3+} 가 발광 중심의 역할을 한다. 주로 펄스광출력을 방출하며 그 파장은 0.6943 μm (적색)이다.

YAG 레이저는 발광중심이 되는 Nd^{3+} 를 YAG 결정에 도핑한 것을 레이저 재료로 사용하는 레이저이다. 이 레이저는 펄스적으로도 연속적으로도 광출력을 방출하는 능력을 지니고 있다.

결정이 아닌 비정질의 글라스에 활성화 이온으로서 Nd^{3+} 를 도핑한 재료를 사용하는 것이 글라스 레이저이다. 이 레이저는 펄스 동작을 하며, 출력 파장은 YAG 레이저와 같은 1.065 μm (적외선)이다.

(2) 기체 레이저

현재까지 수십 종류의 기체에서 레이저 발전이 성공되었으며 발전 파장은 0.28 μm (자외선)에서 774 μm

<표 1> 레이저의 종류와 특성

종 류	대 표 예	파장(μm)	스펙트럼폭(Hz)	지향성(rad)	출 력(W)		특 정	
					연 속	펄 스		
고체 레이저	결정고체 레이저 비정질고체 레이저	루비, YAG 유리, 플라스틱	0.6~2.6	$10^8 \sim 10^{11}$	$10^{-2} \sim 10^{-3}$	$10^{-3} \sim 1$	$10^3 \sim 10^{10}$	고출력
기체 레이저	중성 원자 레이저 이온 레이저 분자 레이저	He-Ne, Xe Ar ⁺ , Kr ⁺ , Cd ⁺ CO ₂ , N ₂	0.28~774	$1 \sim 10^3$	$10^{-3} \sim 10^{-4}$	$10^{-6} \sim 10^4$	$10^{-2} \sim 10^6$	단생성 지향성
반도체 레이저	pn 접합 레이저 전자빔여기 레이저 광역기반도체 레이저	GaAs, GaAlAs CdS, ZnO GaAs, PdTe	0.33~85	$10^{10} \sim 10^{12}$	10^{-1}	$10^{-3} \sim 10^{-1}$	$1 \sim 10$	소 형
액체 레이저	무기액체 레이저 유기액체 레이저	모키시염화세렌 길레트, 색소						

m(원적외선)까지의 넓은 범위에 걸쳐서 있다. 기체 레이저의 특징으로서는 단색성, 지향성이 매우 우수하다는 점을 들 수 있으며, 그 발산각은 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ rad 정도이다.

기체 레이저의 펄핑은 고체 레이저에서의 광펄핑과는 달리 기체 방전에 의해 행해진다. 대표적인 기체 레이저인 He-Ne 레이저를 예로 들어 기체 레이저의 특성을 설명하기로 한다.

He-Ne 레이저에서는 레이저 작용을 하는 원자는 Ne이며 He는 펄핑의 보조역할을 하는 것이다. He와 Ne를 적당한 압력과 비율(He : Ne = 10 : 1)로 길고 가는 방전관에 봉입하여 레이저 발진기를 구성한다. 이 방전관을 방전시키면 Ne의 발광에 의해 파장 $0.6328 \mu\text{m}$ (적색)의 레이저광이 연속적으로 방출된다. 출력은 1~60mW 정도이다.

CO₂ 레이저는 CO₂만으로도 레이저 발진을 시킬 수 있으나 보다 고효율, 고풍출의 레이저 출력을 얻기 위해서는 N₂와 He를 혼합시킨 혼합가스가 사용된다. 일반적으로 기체 레이저는 효율(1% 이하)이 낮고 저출력이지만 CO₂ 레이저는 10% 이상의 고효율이며 파장 $10.6 \mu\text{m}$ (적외선)의 레이저광을 연속적으로 방출한다. 특히 최근에는 방전에 의해 가열된 가스를 유효하게 냉각하는 고순환 CO₂ 레이저가 개발되어 수십 kJ의 고풍출력 연속동작 CO₂ 레이저 장치가 가동

되기 시작했다.

Ar이온 레이저도 중요한 기체 레이저이다.

(3) 반도체 레이저

반도체 레이저의 재료로는 GaAs 등과 같은 화학물 반도체만이 쓰여진다.

반도체 재료를 사용하여 레이저 출력을 얻기 위해서는 n형 및 p형의 화학물 반도체의 pn접합 다이오드를 만들어 이에 순방향으로 전류를 흘려 주어야 한다. 반도체 레이저에서는 전류 펄핑에 광펄핑, 전자빔펄핑 등의 방법이 있으며 어느 방법을 사용하든 모두 초소형이고 효율이 매우 높으며 연속적으로 레이저 출력을 방출시킬 수 있다. 특히 최근에는 동작 특성이 매우 안정하고 1만시간 이상의 장수명을 갖는 2중 헤테로 접합 반도체 레이저가 개발되어 실용되고 있다.

6. 맺음말

이상 레이저의 원리, 레이저광의 특징 및 현재 사용되고 있는 대표적인 레이저의 종류에 대해 그 대략을 살펴보았다. 레이저의 여러가지 우수한 특징을 이용하는 많은 응용분야가 개발되어 실용화 되고 있다. 이 응용분야에 대해서는 다음 호에서 소개할까 한다.

<다음 호에 계속...>