

광학 Focus

-레이저-

※ 이 글은 과학기술처에서 시행한 특정연구개발 사업의 연구보고서로서 한국표준연구소에서 연구한 '레이저 응용기술개발을 위한 사전조사연구'에서 발췌한 것임을 밝힌다※

<1> 레이저 개요

I 분류

레이저(LASER)란 "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation"의 영문 단어들의 머리 글자들을 따서 만든 말로서 "복사선의 유도 방출에 의한 빛의 증폭"이란 뜻을 나타낸다.

레이저 시스템은 대부분 레이저 물질(active medium), 펌핑원(pumping source), 공진기(resonator), 냉각장치(coolant)로 구성되어 있다.

레이저의 종류는 분류 방법에 따라 여러가지가 있다.

레이저매질(active medium)의 종류에 따라

- 기체 레이저 ○ 액체 레이저 ○ 고체 레이저
- 반도체 레이저 ○ 화학 레이저 ○ 자유 전자 레이저 등으로 분류되며

파장영역에 따라

- 가시영역 레이저 ○ 적외선 레이저 ○ 원적외선 레이저 ○ 자외선 레이저 ○ X-선 레이저 등으로 분류되고,

공진기의 종류에 따라

- 안정 공진기(stable resonator)레이저
 - 불안정 공진기(unstable resonator)레이저로 구분되고,
- 레이저 물질을 싸고 있는 공동(cavity)의 역할에 따라

- 도파관(waveguide)레이저
- 개방 공진기(open resonator)레이저로 나뉜다.

또한 레이저 출력이 연속적인지 간헐적인지에 따라서

- cw 레이저
- 펄스(pulse)레이저로 구분되며,

주파수 특성에 따라

- 주파수 프리런닝 (free running)레이저(일반레이저)
- 주파수 가변(tunable)레이저
- 주파수 안정화 레이저로 분류된다.

레이저의 응용분야나 성격에 따라 사용되어야 할 레이저의 종류나 형태가 결정된다.

II 특성

레이저는 보통의 열광원에 비하여 다음과 같은 여러가지 특성이 있다.

- (1) 단위면적당 나오는 출력이 매우 강하다. 작

은 것은 수밀리 왓트에서 큰것은 수십억 왓트까지 현재 생산되고 있다. 단위 시간당 나오는 광자(photon)의 갯수는 $p/h\nu=10^{16}-10^{25}/\text{sec}$ 로 열광자(thermal photon)의 $10^{12}/\text{sec}$ 보다 훨씬 크다.

(2) 직진성(directionality)이 매우 좋다. 즉 레이저의 광속은 퍼지거나 굽어지지 않고 거의 똑바로 나간다. 예를 들면, 지구에서 달까지 거리는 393,600km인데도 지구에서 달 표면에 조명시키면 그 조명된 지역은 3.2km²에 불과하다.

(3) 질이 매우 좋은 단색광(monochromaticity)이다. 단색광이란 순수한 한가지 색을 갖는 빛이란 뜻인데, 이 성질은 매우 중요해서 여러가지로 이용된다. 레이저 스펙트럼의 폭은 거의 무시할 정도로, 진동수에 대한 폭의 비율은 $\Delta f/f \sim 10^8/10^{14} = 10^{-6}$ 에 불과하다. 품질이 아주 우수하고 안정된 기체 레이저의 경우 진동수 안정도 $\Delta f/f$ 는 10^{-13} 에 달한다. 최근에 개발된 기술인 위상변조 분광학을 이용하는 방법으로는 $\Delta f/f = 5 \times 10^{-16}$ 정도까지도 안정화 시킬 수 있게 되었다.

(4) 공간적(spatial)으로나 시간적(temporal)으로 간섭성(coherence)를 갖고 있다. 이것은 한 레이저에서 나오는 모든 광선의 파장이, 다시 말해서 색이 꼭 같고 그 파동의 마루와 골이 꼭 맞아 떨어진다는 뜻으로 이는 보통의 불빛이 난잡하게 폭동을 일으키고 있는 집단이라고 하면 레이저는 아주 훈련이 잘 된 군대와 같다고 비유할 수 있다.

(5) 집속된 광속(focused light beam)이다. 이것을 다시 그림 2-1과 같이 렌즈를 사용할 경우 광속의 직경을 파장 정도로 집속된 반점(spot) 즉 점광원으로 만들 수 있다.

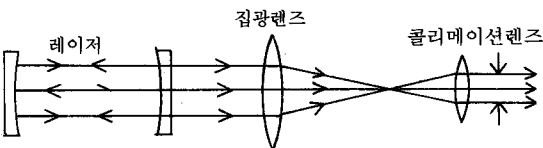
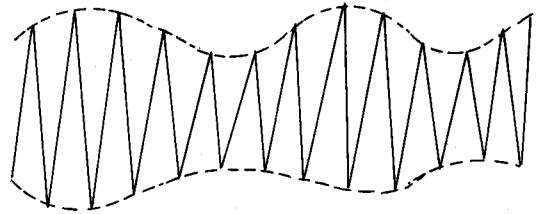
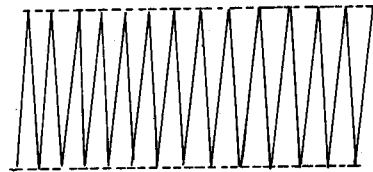


그림 2-1 레이저 광속의 집속

(6) 파형의 특성이 좋다. 즉 통계학적으로 파형의 특성이 매우 좋아 그림 2-2에서 보는 바와같이 시간의 변화에 따라 변화가 거의 없다.



(a) thermal source



(b) laser

그림 2-2 열원(thermal source)과 레이저의 파형변화

III 레이저 개발의 추세

1. 서론

레이저의 종류는 분류 방법에 따라 I에서와 같이 여러가지로 구분되며, 레이저 물질의 종류에 따라 좀더 세분하면 표2-1과 같이 매우 종류가 다양하다.

표 2-1 레이저 종류

기체 레이저	헬륨 네온 레이저, 질소 레이저, 탄산가스 레이저, 크립톤 레이저, 아르곤 레이저, 금속 증기 레이저, 엑시머 레이저, 광분해 옥소 레이저, 알코홀 레이저, 암모니아 레이저 등
고체 레이저	Nd : YAG 레이저, Nd : Glass 레이저, 루비 레이저, Golor Center 레이저, 주파수 가변 고체 레이저, Slab 레이저 등
액체 레이저	각종 색소 레이저
반도체 레이저	III-V 화합물 반도체 레이저, II-VI 화합물 반도체 레이저 등
화학 레이저	HF 레이저, DF 레이저 등

레이저의 활용성을 극대화하기 위해서 현재 선진국에서 연구하는 방향은

- 고출력화 ○ 소형화 ○ 주파수(파장)가변
- 파장영역 확대 ○ 짧은 펄스 발진 ○ 주파수 및 출력 안정화

등이다. 이러한 국제적 추세에 맞추어 레이저 종류를 구별하고, 그 특성 및 개발의 추세를 다음 절에서 자세히 논한다.

② 고출력 레이저 개발

고출력 레이저로는

- Nd : glass 레이저 ○ Nd : TAG 레이저
- 탄산가스(CO) 레이저
- 광분해 옥소 레이저 ○ 자유전자 레이저 (FEL) ○ 고체 slab 레이저

등이 있으며, 응용 목적에 따라 사용되는 레이저가 결정된다. 고체 레이저는 레이저가 개발된 이래로 매질의 열적, 역학적 안정성과 지속성으로 인하여 많은 분야에서 개발되어 응용되어 왔다. 이들 고체 레이저의 개발 방향은 크게 다양한 파장에서의 레이저 발진과 고출력 레이저 개발 분야 및 소형화를 위해 반도체 레이저 펌핑 고체 레이저 개발 분야로 나뉘어져서 진행되었다.

표 2-2 고출력 레이저 특징과 이용 분야

레이저 종류	특 징	이 용 분 야
Nd : Glass	가장 높은 출력 (100TW)	핵융합, 플라즈마 연구 등
ND : YAG	고 출력(~KW), 간편	재료가공, 의학, 측정 등
고체 Slab	소형, 1.06 μ m, 고 출력(cw2 KW)	재료가공, 의학 등
탄산가스	고 효율(23%), 고 출력(20KW)	재료가공, 의학 등
광분해 옥소	저렴한 유지비 고 출력(~2TW)	핵융합, 플라즈마 연구 등
자 유 전 자 (FEL)	주파수 변조 가능, 고출력(~MW)	의학, 물리, 화학, 재료 등

표 2-2는 이와 같은 고출력 레이저들의 특징과 이용 분야를 보여준다.

이 중에서 Nd : Glass 레이저는 레이저 핵융합 기술이나 플라즈마 관련 기술에 많이 활용되고 있다. 그림 2-3은 미국의 Lawrence Livermore National Laboratory에 있는 1.05 μ m 파장에서 100kJ를 내는 NOVA System의 증폭시스템 내부구조도이다.

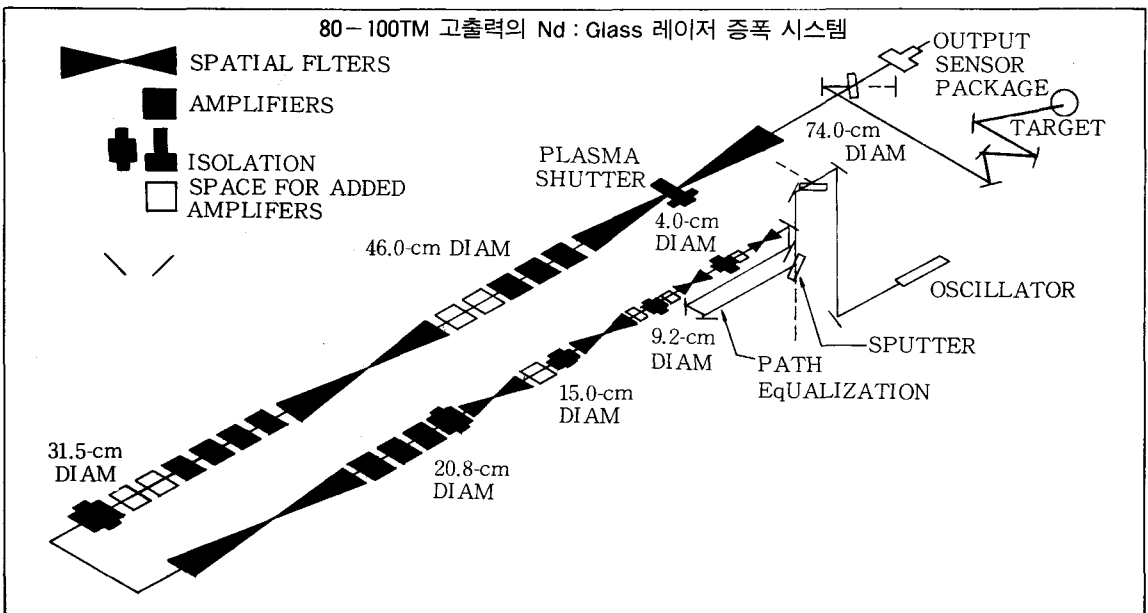


그림 2-3. NOVA System의 증폭시스템 내부구조도

고체 레이저 중 가장 많이 사용되는 Nd : YAG 레이저는 Yttrium Aluminum Garnet (YAG)에 Neodymium을 첨가(doping)하여 레이저 매질을 사용하는 고체 레이저로서 1.06 μm 의 파장을 내며, 1초에 수십Hz의 비교적 많은 반복 횟수로 레이저를 발생시킬 수 있다. 또한 형광 선폭이 좁아 이득이 높으므로 비교적 낮은 문턱(threshold) 값에서도 레이저 발진이 가능하다. 이 레이저는 응용범위가 다양하여, 레이저 가공, 의학, 거리, 공해 측정 등에 사용된다.

이상과 같이 현재 가장 많이 개발되어 응용되고 있는 고출력 고체레이저로는 루비 레이저, Nd : YAG 레이저, Nd : Glass 레이저 등이다.

그러나, 이들 레이저들이 고출력을 낼 때 레이저 매질인 고체 rod가 열적인 영향으로 광학적 불균일이 야기되는데 이들은 모두 레이저의 고출력과 수명에 악영향을 끼쳐왔다. 열적인 영향으로 생기는 불균일은 첫째 매질내의 온도의 불균일에 의해 야기되는 thermal lensing 효과, 둘째 열적인 stress에 의한 biaxial focusing과 복굴절 등이다. 이들 효과에 의해서 고체 레이저의 고출력화는 한계에 부딪치게 되었으며 새로운 형태의 매질 형상(rod geometry)을 연구하게 되었는데 이 문제를 해결할 수 있는 것이 slab레이저이다.

Slab 레이저의 원리는 기존의 고체 레이저와 같으나 다만 레이저 매질인 고체 rod를 그림 2-4에 나타나 있는 것과 같이 직육면체(slab)로 자른 후 rod끝을 Brewster angle이 되도록 자른 것이 다르다. 이렇게 rod형태를 일반고체 레이저의 cylinder형에서 slab 형태로 바꾸면 레이저 광이 매질내에서 다른 경로로 진행하게 된다. 즉, 그림2-4에서와 같이 레이저 광은 slab내에서 내부 전반사를 하면서 zig-zag 형태로 진행하게 된다.

이렇게 slab 형태의 레이저 rod를 사용하게 되면 첫째 매질내에서 온도구배가 없어져서 기존의 고체 레이저에서 해결 못한 thermal lensing 효과가 없어지고, 둘째로 레이저의 진행이 zig-zag로 진행함으로써 rod 방향의 stress효과가 없어져서 열적인 stress에 의한 biaxial focusing

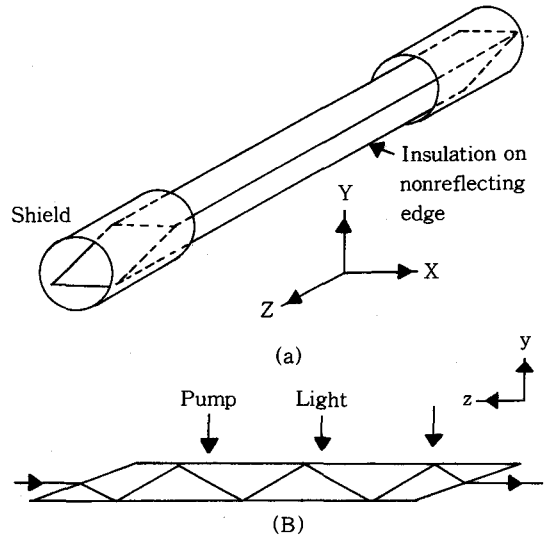


그림 2-4 Slab 매질 모양

- a) pumping cavity 안에서 shield와 insulation한 rod 모습,
- b) 레이저 광의 slab 레이저 rod를 지나가는 모습

과 복굴절 영향이 사라지게 된다. 또한 slab 형태의 rod는 flash lamp를 여러개 사용하여 pumping 하기가 용이하여 고출력 발생시 매우 유리하다.

이미 선진국에서는 재료가공, 영접 등의 산업적 군사적 응용을 목적으로 slab형 고출력 고체 레이저를 개발하고 있다. 실제로 이미 일본에서는 slab Nd : YAG 레이저로 기존의 Nd : YAG 레이저 출력의 15배인 평균출력 1.5KW를 얻는데 성공하였으며, slab Nd : YAG, slab Nd ; Glass, slab Alexandrite, slab Nd : GSGG 레이저 개발 등의 연구가 세계 각국에서 진행중이다. 따라서, 기체 레이저로써 고출력을 낼 수 있는 CO₂ 레이저와, 기존의 Nd : YAG, Nd : Glass 레이저 등의 문제점을 보완하여 앞으로 고출력 레이저 응용 분야에서 광범위하게 사용될 slab 형태의 고체 레이저 개발이 국내에서도 시급히 시작되어야 한다.

Slab 레이저의 개발 가능성은 이미 국내 여러 연구 기관 및 학교에서 축적된 고체 레이저 개발 기술과 정부의 정부의 적극적인 지원 정책이 함께 있어야만 가능하다. 왜냐하면 slab 레이저 rod는

기존의 레이저 rod보다 가격면에서 약 5-10배 정도 비싸고, pump cavity의 개발이 또한 최첨단의 과학 기술이기 때문이다. 그러나, 소형이면서 고출력이며 영구성이 있는 고체 레이저로서의 slab레이저는 그 개발 중요성과 응용 분야가 매우 크다고 하겠다.

CO₂ 레이저는 CO₂, N₂, He의 혼합 기체를 사용하는 효율이 가장 높은 레이저이며 이론적으로는 약40%에 달하여 효율적인 고출력 발생에 적합하다. 파장은 8-11 μ m의 적외선 영역에서 넓은 발진 파장폭을 가지므로 적외선 영역의 분자 분광학뿐만 아니라 대기오염도 측정, 장거리 측정 등에 응용되고 있다. 또한 재료의 절단이나 용접, 구멍뚫기 등의 재료가공과 의술 등에 특히 많이 활용된다. 또한 핵융합 실험, 동위 원소 분리등에도 그 응용 범위가 점차 넓어지고 있으며 실용화 되어 가고 있는 실정이다.

1964년 C. K. N Patel에 의해 CO₂ 레이저가 개발된 이래 출력면이나 그응용면에서 상당한 진전이 있어 왔다. 먼저 cw CO₂레이저에 대해 살펴보면, 1967년 500W 출력을 얻었고, 횡류(transversely flow)방식에 의해 1 KW를 얻었고, 1972년 fast-flow 방식에 의해 15 KW의 출력을 얻었다. 또 1975년에는 이미 미국의 Alberta대학에서 상품화 개발에 성공하였고, 1984년에는 20KW 발전에 도달하였다.

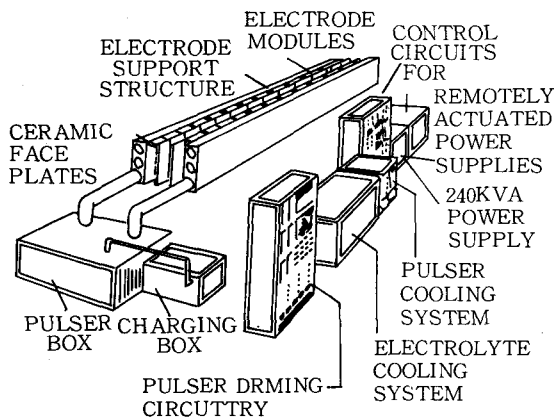


그림 2-5

그림 2-5은 미국 A/berta 대학에서 개발한 cw20KW출력의 CO₂레이저와 그 구조도이다.

각국에서 개발한 cw의 고출력 CO₂ 레이저는 표 2-3과 같다.

표 2-3 각국에서 개발된 고출력 CO₂레이저

국 가	기관 또는 회사명	출 력
미 국	Alberta 대학 Majestic Laser System	20KW
일 본	Mitsubishi Co. (SAGE)	20KW
프 랑 스	Les Laboratoires de Marconssis	10KW

TEA-CO₂레이저는 double discharge, triple discharge, spark array discharge, surface corona discharge 등이 연구되었으며 최근에는 1984년 Italy의 R.Marchetti 등에 의해 pyrex tube 를 이 용 한 새로운 surface corona preionizer가 제안되었다. 현재까지 실험적으로 얻은 최고 효율은 1972년 미국의 Yu-Li Pan 등이 얻은 23%이다. 그 이외는 대개 약 10%의 효율을 가지고 증폭기를 적용하여 고출력을 얻는데 주력하고 있다. 또 레이저 매질을 흘려버리지 않고, H₂, CO₂등 첨가 기체를 써서 방전시 발생된 O₂나 음이온의 생성을 억제함으로써 기체를 가둔 상태에서 사용할 수 있게 한 sealed-off type 레이저도 연구되어 1985년 Italy에서 400pps 로써 14시간의 수명을 얻었다.

또한 70년대 후반부터 CO₂ 레이저로 다른 분자 매질을 펌핑하여 장파장의 원적외선 레이저 연구가 시작되었다. 원적외선 레이저 매질로는 CH₃OH, CH₄, CH₃I, CH₃F, SF₆, NH₃, Para-H₂ 등 50여종에 달한다.

고출력 레이저만의 고유한 응용 분야인 레이저 핵융합에는 주로 Nd: glass 레이저가 이용되고 있으나, 미국의 Los Alamos Scientific Laboratory 에서는 400J, 10kJ, 100kJ, (Peak power: 0.4TW, 20TW, 100-200TW) 의 세 TEA CO₂레이저 그룹을 이용하여 레이저 핵융합 실험을 수행하고 있다.

동위원소 분리 실험은 주로 미국과 소련, 일

본, 프랑스 등에 의하여 주도되고 있다. BC13 (1975, USSR), SiF4(Canada), SF6, UF6 등 분자 상태에서의 B, Si, S, U 동위원소 분리 실험이 행해졌다. 특히 U²³⁵의 농축과 D, H 동위원소의 분리는 세계 연료 문제에 있어서 매우 중요한 연구가 되고 있다. 레이저 동위원소 분리법을 이용한 U²³⁵의 농축은 현재 사용되고 있는 운영비보다 20-30%의 비용을 낮출 수 있을 것이다. UF6분자에서 U 동위원소 분리에 응용되는 파장은 16 μ m인데 이에 적합한 레이저는 1978년도 개발된 para-hydrogen stimulated 라만 레이저로서 미국과 일본에서 활발히 연구중이며 실용화 단계에 있다. 최근에는 Brazil(1986)에서도 H₂라만 레이저의 발전에 성공하였고, 1985년 일본에서는 H₂라만 레이저를 이용하여 UF₆분자의 동위원소 분리 실험을 완수하였다.

광분해 옥소 레이저는 1964년 Kasper 와 Pimentel이 개발한 기체 레이저로 C₂H₅I, C₂F₅I, i-C₃F₇I 등의 옥소 화합물을 Xe, Ar 등의 섬광 등으로 광펌핑시킬때 1.315 μ m의 빛을 내며 레이저 동작이 이루어진다. 옥소 레이저는 전기적 에너지가 레이저 변환되는 효율이 0.1-0.6%로 낮지만, 들뜬 상태의 수명이 130ms로 길어서 여러 단계의 증폭이 가능하고, 매질의 이득이 0.6/cm 정도로 크며, 출력빔이 우수하여 고출력 레이저로의 개발이 용이할 뿐 아니라 유지비가 저렴하다는 장점을 가지고 있다.

표 2-4는 광분해 옥소레이저의 세계적 개발 현황이다.

표 2-4 광분해 옥소 레이저의 세계적 현황

국 가	연 구 기 관	출 력
독 일	Max-Planck 연구소	2TW
미 국	Sandia Lab.	100GW
소 련	Lebedev 연구소	100GW
영 국		수십GW
프 랑스	Laboratoires de Marcoussis	수십GW
한 국	KSIST	1GW

이러한 고출력 광분해 옥소 레이저는 레이저와 물질과의 상호작용을 연구하는 레이저 플라즈마, 새로운 에너지원 개발을 연구하는 레이저 핵융합 분야나 우라늄, 탄소 등의 동위원소 분리 등에 이용되고 있다. 그리고, 최근에는 미국의 항공 우주국(NASA)에서 전략방위계획(SDI)에 이용하고자 태양광을 펄핑광원으로 하는 옥소 레이저 발전기 및 증폭기를 연구하고 있으며 옥소 레이저를 이용하여 파장이 10-200 \AA 정도로 매우 짧은 연 X-선 레이저 개발에도 많은 연구가 진행중이다. 또한 CO₂ 레이저와 같이 연속적으로 동작시키고자 하는 연구도 많이 진척되어서 현재는 상용으로 개발된 것도 있는 실정이다.

우리 나라의 경우에는 1976년부터 주로 과학 기술원에 의해 연구되어 왔으며, 현재는 출력 12.7 J, 1 GW를 내는 증폭기가 운영되고 있고, 이를 이용한 레이저 플라즈마 연구가 진행 중에 있다.

자유전자 레이저(FEL)는 넓은 영역에서 주파수 (또는 파장)를 변조할 수 있는 고출력 레이저로서 최근에 많이 개발하고 있는 레이저이다. 자유전자레이저 파장은

$$\lambda L = \lambda W / \gamma^2$$

인데, 여기서 λw 는 자석 간격(wiggler period)이며, γ 는 전자에너지이다.

따라서 λw 또는 γ 를 변화시키면 쉽게 레이저 파장을 변조할 수 있다.

자유전자를 가속시키는 가속기로는

- Induction linear accelerator
- Van de Graaff accelerator
- Microtron RF accelerator
- RF linear accelerator
- Superconducting accelerator

등이 있다.

자유전자 레이저는 고출력이면서 파장의 변조가 가능하므로 의학, 물리, 화학, 재료 등의 연구에도 사용될 뿐만 아니라 미국에서는 SDI의 일환으로 이것을 개발하고 있는 중이다.