

펄스 펌핑 고체레이저의 다중통과 증폭기에 대한 이론적 고찰

이 용 우

전남도립남도대학 전기전자과, 광산업기술지원센터

Output Characteristics of KrF Excimer Laser Pumped H₂/D₂ Raman Laser

Yong Woo Yi

Dept. of Electronic Engineering, Namdo Provincial College

E-mail : ywyi@namdo.ac.kr

요 약

본 논문에서는 Nd:YAG 레이저의 제 2고조파에 의해 펌핑되는 고체레이저의 다중통과 증폭기의 이론적 고찰에 대하여 논하였다. 다중통과 증폭기의 입력레이저는 Ti:sapphire 레이저이며, 펌핑광원의 주입 후 입력 빔의 통과 회수에 따른 추출효율, 소신호 이득계수에 대한 변화 등을 조사하여 다중통과 증폭을 위한 최적조건을 구하였다. 또한, 실험에서 2단 다중통과 증폭기에서 790 nm의 입력 파장을 주입하였을 때, 42 mJ의 최대 출력에너지, 21 dB의 증폭이득, 25%의 출력효율을 얻었다.

키워드

Ti:sapphire laser, 다중통과 증폭기, 소신호이득계수, 추출효율

1. 서 론

광대역 파장가변 레이저는 그 풍부한 응용성 때문에 1960년 레이저가 처음 개발[1]된 이후, 오늘날까지 광범위하게 연구되고 있다. 현재까지 개발된 대표적인 파장가변 레이저는 색소레이저, 색중심 레이저, 자유전자 레이저, 고체레이저, 라만(Raman) 레이저, 고압 CO₂ 레이저와 반도체 레이저 등이 있으며, 비선형 특성을 이용한 OPO(optical parametric oscillator)가 있다.

지금까지 좁은 스펙트럼 선폴을 갖는 펄스형 파장가변 레이저는 공진기 내의 손실이 매우 크기 때문에 높은 펄스에너지를 얻을 수 없었다. 따라서, 높은 펄스 에너지를 얻기 위해서는 여러 단의 증폭기를 구성하여 레이저 광을 증폭시키는 MOPA(master oscillator power amplifier)방식[2]가 주로 연구되어 왔다. 이 방식은 입력펄스가 증폭기 매질을 한 번만 통과되기 때문에 증폭기 매질에 저장된 에너지를 충분히 추출해 낼 수 없으며, 높은 펄스 에너지를 얻기 위해서는 다단의 증폭시스템이 요구되어 구성이 복잡해지고 대형화되는 문제점이 있다. 최근 연구되고 있는 재생 증폭기(regenerative amplifier)[3, 4]와 다중통과 증폭기(multipass amplifier)[5]는 입력 펄스를 증폭매질에 다중 통과

시키므로써 높은 증폭 이득과 에너지 추출효율을 얻을 수 있으며, 장치가 소형화되는 장점이 있다 [6]. 여기서 재생증폭기 역시 광대역 파장범위에서 광학소자들의 코팅에 제약이 있다. 특히, 이러한 목적을 위해 증폭매질을 통과하는 회수와 소신호 이득계수와의 관계가 해석되어야 한다[7].

본 논문에서는 Nd:YAG 레이저의 제 2고조파에 의해 펌핑되는 고체레이저의 다중통과 증폭기의 이론적 고찰에 대하여 논하였다. 다중통과 증폭기의 입력레이저는 Ti:sapphire 레이저이며, 펌핑광원의 주입 후 입력 빔의 통과 회수에 따른 추출효율, 소신호 이득계수에 대한 변화 등을 조사하여 다중통과 증폭을 위한 최적조건을 구하였다. Ti:sapphire 레이저 발진기를 다중 프리즘 Littrow 회절격자 방식의 공진기로 구성하고, 여러 개의 직각 프리즘 쌍으로 구성된 2단의 다중통과 증폭기를 구성하였다. 최적 다중통과 증폭기의 설계를 위해 포화특성을 해석하여 증폭이득을 향상시키고, 최적 통과회수를 결정하였다.

II. 펄스펌핑 다중통과 레이저 증폭기

2.1 다중통과 증폭이론

이론적 해석을 위한 다중통과 증폭 시스템의 구성은 그림 1과 같다. 다중통과 증폭기는 재생증폭기와 같이 다양한 광학기기가 필요하지 않기 때문에 손실에 대한 해석은 간단하다. 다중통과 증폭기를 구성하는 광학기기는 증폭매질과 입력펄스를 다중통과 시키기 위해 직각프리즘 쌍이나 전반사경 쌍이 사용된다.



그림 1. 각도 다중통과 증폭기의 구성, E_p =펌핑에너지, E_s =입력에너지, E_{out} =출력에너지, L =증폭매질의 길이.

본 실험에서 구성한 Q-스위칭 된 Nd:YAG 레이저의 짧은 펄스 형태의 레이저에서 증폭 과정들이 펄핑을 $Wp(\sim 3.8 \mu\text{sec}^{-1})$ 와 자연방출 시간 $\tau_f(3.2 \mu\text{sec})$ 에 비해 매우 빠르다. 여기에서 $\tau_f(\text{FWHM} : 10\text{nsec}) \ll \tau_f, Wp-1$ 이고, τ_p 는 증폭매질을 통과하는 입력펄스의 폭이며, 증폭하는 과정은 발진기로부터 입력펄스가 증폭 매질에 도착하기 전에 상준위로 에너지가 이미 저장된다고 할 수 있다. 입력펄스가 증폭 매질을 통과할 때, 상준위에 저장된 에너지가 방출되도록 원자들을 자극한다. 이러한 증폭과정은 밀도 반전 분포를 표현한 식(1)과 광자의 밀도 변화율을 표현한 식(2)로 나타낼 수 있다 [1].

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\gamma n \phi \sigma c - \frac{(n + N_{sat})(\gamma - 1)}{\tau_f} + W_p(n_{st0} - n) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = c \phi \sigma n - \phi \tau_c + S \quad (2)$$

여기서 $\gamma = 1 + g_0 L$, $\tau_f = \tau_{21}$ 이고, S 는 자연방출이 레이저 발진에 기여하는 비율, τ_c 는 광 공진기에서 광자들에 대한 감쇄 시간이다. 펄스 길이 동안에 펄핑과 형광(fluorescence) 효과를 무시한다면, 다음 식(3)과 같은 밀도 반전분포에 대한 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\gamma n \phi \sigma c \quad (3)$$

반전된 분포를 갖는 매질을 통과하는 펄스의 성장은 시간에 의존하는 광자 전송 방정식의 비선형성으로 표현될 수 있다. 이는 활성 매질에서 방사 효과 설명하며, 다음 식(4)와 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = c n \sigma \phi - \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right) c \quad (4)$$

광자의 밀도가 매질의 적은 체적에서 변화하는 비율은 유도방출 과정에 의한 광자들의 발진과 그 영역으로부터 유출되는 광자의 흐름 사이의 순수

한 차와 같다. 광자의 유출은 식(4)의 오른쪽 두 번째 항과 같이 표현되며, 전파 과정들을 특정 짓는 어항은 식(2)에는 없다.

길이가 L 인 막대의 전방 표면에서 입사된 방사선의 단색성 빔의 1차원적인 경우를 고려해 보면, Ti:sapphire 레이저의 상준위에서 형광수명(fluorescence lifetime)은 $3.2 \mu\text{s}$, 실험에서 사용된 펄핑 광원(532 nm)의 펄스 폭은 10 ns 이다. 또한 펄핑 빔의 강도 분포와 이득계수의 분포는 방사형이라고 할 때, 효과적인 이득계수는 다음 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$g_{eff} = \frac{\int g_0(\nu) I_B 2\pi r dr}{\int I_B(\nu) 2\pi r dr} \quad (5)$$

$g_0(\nu)$ 는 방사형 이득분포, $I_B(\nu)$ 는 방사형 강도분포이다. 레이저의 증폭 기술에서 소신호 이득계수 $g_0 = n \sigma_{21}$ 로 표현할 수 있는데,

$$g_0 = \beta E_{st} \quad (6)$$

$$\beta = \frac{\sigma_{21}}{h\nu} \quad (7)$$

인 관계가 있으며, 이때 E_{st} 는 단위 체적당 저장된 에너지, β 는 저장된 에너지와 이득계수를 연결해주는 매개변수이다. 따라서, 반전된 전자분포 n 과 광속(photon flux) ϕ 에 대한 풀이에서 레이저 입력신호를 증폭매질에 한번 통과시키면 출력 에너지밀도는 아래와 같이 표현된다[8-10].

$$E_{out} = E_{st0} \ln[1 + (\exp(E_s/E_{sat}) - 1) \exp(\beta E_{st} L)] \quad (8)$$

여기에서 포화 플루엔스(saturation fluence) $E_{sat} = h\nu/\sigma_{21}$, 초기에 결정되는 단위 면적당 소신호 이득계수와 저장에너지는 $g_0 = (\sigma_{21} E_s)/(h\nu L)$ 와 $E_{st0} = g_0 E_{sat}$ 로 주어진다. 첫 번째 통과 때의 에너지 추출효율을 구하면 다음과 같다.

$$E_{eff} = (E_{out} - E_s)/(g_0 E_{st} L) \quad (9)$$

여기에서 h 는 플랑크 상수, ν 는 펄핑펄스의 진동수, σ_{21} 는 입력 펄스의 중심파장에서 유도 방출 단면적, E_p 는 펄핑 펄스의 단위 면적당 에너지, L 은 증폭매질의 길이이다. 증폭매질을 한번 통과하여 출력되는 플루엔스 E_{out1} 을 증폭매질에 다시 통과시키면 출력되는 플루엔스는

$$E_{out2} = E_{st0} \ln[1 + (\exp(E_{out1}/E_{sat}) - 1) \exp(\beta E_{st} L)] \quad (10)$$

으로 표현될 수 있으며, 이때 단위 면적당 저장에너지는 $E_{st0} = g_0' E_{sat}$ 로 증폭매질에 저장된 에너지의 추출로 초기의 저장 에너지 E_{st0} 보다 작은 값을 가지게 되며, 두 번째 증폭에서 소신호 이득계수 역시 g_0' 는 이전의 값보다 작아지게 된다.

$$g_o' = g_o(1 - E_{en}) \quad (11)$$

표 1. 다중통과 증폭기의 펌핑 빔과 입력신호의 주요변수.

Input parameters		Input data
Diameter [mm]	Dp	1.5
Pulsewidth [ns]	tp	10
Wavelength [nm]	λp	532
Pump energy [mJ]	Ep	30, 35, 45
Diameter [mm]		1.52
Pulsewidth [ns]		13
Number of pass		8~15
Input energy [μJ]		100, 200, 300

표 2. 다중통과 증폭기에서 광학소자의 손실과 레이저매질의 주요변수

Input parameters	Input data
n_R , refractive index at 790 nm	1.76
$\sigma_{21}(x 10^{-19} \text{ cm}^2)$, stimulated emission cross section,	3.0
Number of reflection surfaces	N_R
Reflective loss of prisms	$N_R \times 0.04$
Reflective loss of lens	$N_R \times 0.04$

2.2 다중통과 증폭기 해석 파라메타

다중통과 증폭기에서 통과횟수에 대한 에너지 추출 효율, 소신호 이득계수 등의 증폭특성을 해석하기 위해 파라메타를 설정하였다. 증폭기에 대한 해석을 위해 펌프 빔과 입력펄스에 대해 빔의 지름, 펄스폭, 파장, 펌프 에너지를 파라메타로 설정하였으며, 표 1에 나타내었다. 표 2는 다중통과 증폭기를 구성하고 있는 증폭매질의 특성과 광학소자들의 손실을 나타낸다.

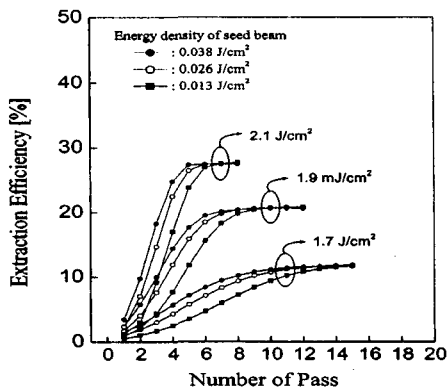


그림 2. 첫 번째 다중통과 Ti:sapphire 레이저 증폭기에서 계산된 추출효율(L=2 cm).

2.3 펄스펌핑 다중통과 증폭기의 이론적 해석

그림 2는 첫 번째 증폭기를 통과하는 횟수에 따른 에너지 추출효율을 계산한 값으로 식(9)에 의해 구할 수 있다. 0.013, 0.026, 0.038 J/cm²의 입력 플루언스와 1.7, 1.9, 2.1 J/cm²의 펌핑 에너지밀도에 대한 세 경우에 대해 각각 계산하였다. 여기서 펌핑에너지가 클수록 추출효율이 증가하고, 적은 통과횟수에서 포화현상이 나타남을 알 수 있다. 동일한 펌핑에너지에 대해서 각기 다른 입력 플루언스를 주입시켰을 때, 궁극적으로 유사한 값에서 포화가 되며 통과횟수는 달리 나타남을 알 수 있다.

그림 3은 다중통과 증폭기에서 입력 펄스가 증폭매질을 다중통과했을 때, 소신호 이득계수의 변화상을 나타낸 것이다. 증폭특성을 해석하기 위해 스펙트럼 선폭 0.13 cm⁻¹, 빔 발산각 1.2 mrad의 특성을 갖는 세 경우의 입력펄스 0.038, 0.026, 0.013 J/cm²를 증폭매질에 주입하고, 증폭매질의 펌핑 에너지밀도 2.1, 1.9, 1.7 J/cm²에 대해 소신호 이득계수를 구하였다. 식(11)에서 설명된 것처럼 증폭매질에 저장된 에너지는 다중 통과되는 입력 펄스에 의해 점점 감소해지며, 통과횟수에 따라 소신호 이득계수의 값도 작어지게 된다. 동일한 펌핑 에너지의 조건에서 매질을 통과하는 입력펄스의 횟수가 증가하면, 각각 다른 에너지밀도의 입력펄스의 소신호 이득계수는 감소가 둔화되다가 결국 같은 값을 갖게 되며, 증폭매질에서 추출효율은 더 이상 커지지 않는다. 이는 증폭매질의 상준위에 저장된 에너지가 결핍되는 현상으로 설명되며, 통과 횟수에 따라 다중통과 증폭기의 출력에너지는 포화곡선을 그리게 된다[7].

그림 4는 증폭기에서 통과횟수에 대한 출력에너지를 계산한 값을 나타내며, 앞에서 언급한 소신호 이득계수와 에너지의 추출효율 등과 같은 결과를 갖는다. 이러한 계산 값에 적용시켜 본 실험장치에서는 발전기로부터의 입력펄스를 0.38 J/cm², 펌핑 에너지 밀도를 2.1 J/cm²로 결정하였다. 첫 번째 증폭기를 4회 통과하도록 구성하고, 소신호 이득계

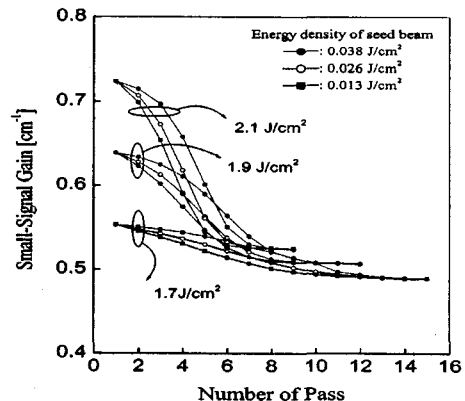


그림3. 첫 번째 다중통과 Ti:sapphire 레이저 증폭기에서 계산된 소신호 이득계수(L=2 cm).

수와 출력에너지의 포화특성을 산출하였다.

또한, 두 번째 증폭단을 부차하여 최적의 포화특성을 산출하여 그림 6에 나타내었다.

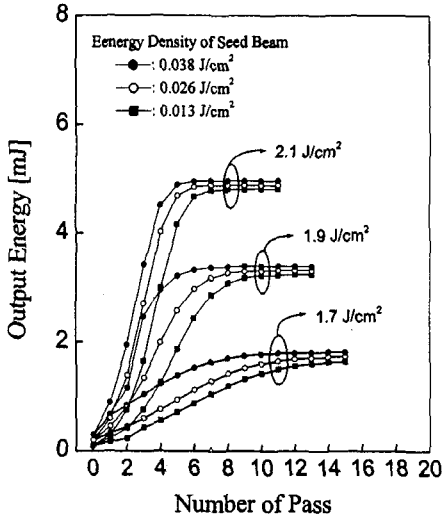


그림 4. 첫 번째 다중통과 Ti:sapphire 레이저증폭기의 계산된 출력에너지 (L=2 cm).

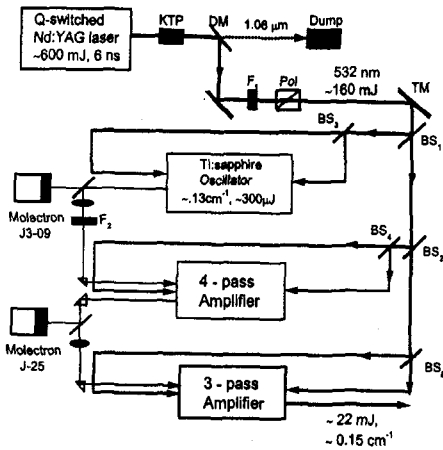


그림 5. 2단의 다중통과 Ti:sapphire 레이저 증폭기의 전체구성도, DM; 이색코팅 거울, F; 필터, Pol; 편광판, TM; 전반사거울, BS; 광속분할기

III. 실험장치 및 결과

3.1 다중통과 증폭기의 구성

본 연구에서 다중통과 증폭기는 그림 5와 같이 2단으로 구성되어 있으며, 펄스 증폭시스템에서 높은 이득과 추출효율을 얻을 수 있게 하였다[11, 12]. 첫 번째 다중통과 증폭기에서 여섯 번까지 통과시켜 계산값과 비교하였으며, 다중통과 증폭에서 레이저빔 품질을 높이기 위해 사용되는 구면거울

(concave mirror)대신 레이저빔의 발산각 1.2 mrad에 맞춰 초점거리가 1.2 m인 집속렌즈를 삽입시켜 광축을 정렬하였다. 증폭기에서 다중통과 구조는 증폭기의 막대가 브루스터 각으로 잘려져 있기 때문에 그림 1과 같은 평면도에서 수평각을 갖는 구조를 형성한다. 증폭매질에서 펌프 빔과 레이저 빔의 크기는 증폭매질의 단면에서 반사된 이미지의 크기를 Spricon사의 Laser Beam Analyzer(Model lba-100A)로 측정하여 조정하였다. 첫 번째 증폭매질의 크기는 8 mm(φ) x 20 mm(L)이며, 막대의 양단은 브루스터 각 (600 24' 5")으로 절단되었으며, Nd:YAG 레이저의 제 2조화파에 대해 97 %의 흡수율을 갖는다. 증폭매질의 양단에서 펌핑하는 제 2조화파의 전체에너지는 34 mJ이며, 가우시안 분포를 갖는다. 증폭매질 양단의 입사지점에서 입력 펄스와 펌프 빔의 지름은 1.1 mm와 1.0 mm로 레이저 빔의 지름이 약간 크다. 그 이유는 증폭매질에서 레이저 빔이 다중통과될 때 펌핑 단면적을 완전히 감싸서 에너지의 손실을 최소화하기 위한 것이다. 계산 및 실험결과에 따라 15x15x15 mm³의 직각 프리즘 쌍을 사용하여 통과 횟수를 네 번으로 결정하여 수 mJ의 출력에너지를 얻었다.

두 번째 다중통과 증폭기는 펄스 당 수십 mJ, 100 MW/cm² 급의 파워증폭기의 역할을 한다. 첫 번째에서 증폭된 레이저 빔은 초점거리가 1 m인 집속렌즈에 의해 1.6 mm로 정렬되어 입사되며, 펌프 빔과 같이 증폭매질의 입사면에서 측정되어 빔의 크기가 조정된다. 증폭매질(농도 0.07 %)의 크기는 6 mm(φ)x15 mm(L)이며, 막대의 양단은 브루스터 각(600 24' 5")으로 절단되었다. 증폭매질의 양단에서 펌핑하는 전체에너지는 80 mJ이며, 가우시안 분포를 갖는다. 증폭매질 양단의 입사지점에서 레이저 빔과 펌프 빔의 지름은 1.7 mm와 1.6 mm로 레이저 빔의 지름이 약간 크며, 각 프리즘 쌍을 사용하여 네 번까지 왕복시켰다.

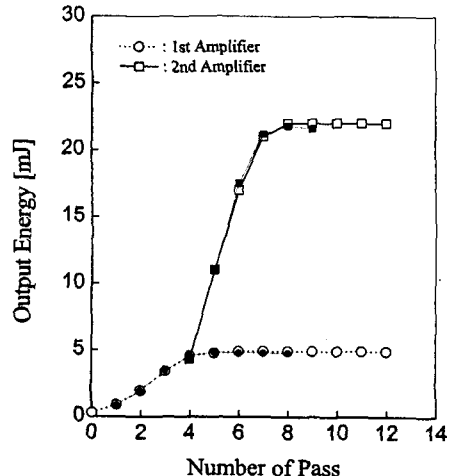


그림 6. 790 nm 파장에서 첫 번째와 두 번째 증폭기의 출력특성.

3.2 다중통과 증폭기의 출력특성

그림 6은 2 단의 다중통과 증폭기에서 통과횟수에 대한 출력에너지의 포화특성을 나타낸 것이다. 첫 번째 증폭단(○, ●)에서 펌핑에너지는 34 mJ이고, 양 방향펌핑될 때의 에너지밀도는 각각 2.1 J/cm²이다. 펌핑 빔은 가우시안 분포이며, 증폭결정 양단의 입사지점에서 입력펄스와 펌프 빔의 지름은 각각 1.1 mm와 1.0 mm이다. 이 이유는 증폭 결정에서 레이저 빔이 다중통과될 때 펌핑 단면적을 완전히 감싸서 에너지의 손실을 최소화하기 위한 것이다. 제 1단 증폭기에서 통과횟수를 8회까지 변화시키면서 실험하고, 포화모델에 대한 해석을 하여 비교함으로써 최적의 통과횟수를 결정하였다. 그림에서 통과횟수에 대한 출력에너지의 계산 결과와 구성된 시스템의 측정결과를 비교할 때, 각 단에서 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. Ti:sapphire 레이저 발진기로부터 얻은 300 μJ, 10 ps이하의 펄스를 증폭기에 주입하여 출력에너지가 포화되는 조건을 찾았으며, 4회의 통과횟수 때 4.7 mJ, 5회 때 4.9 mJ에 이르렀다. 6, 7회로 증가함에 따라 출력에너지는 감소하며, 레이저빔의 품질은 나빠진다. 따라서, 첫 번째 증폭기에서는 에너지가 포화되는 4회를 최적조건으로 하고, 두 번째 증폭단을 부착하여 출력을 높이는 결과를 얻었다[6].

두 번째 다중통과 증폭기(□, ■)도 양 방향에서 펌핑되며 전체 펌핑에너지는 80 mJ이고, 에너지밀도는 각각 2.8 J/cm²이다. 여기에서 증폭기의 펌핑 에너지밀도를 3 J/cm² 이상 높이지 못하는 이유는 펄스의 첨두치에서 파워밀도가 평균치의 3~4배에 달해 결정에 손상을 주기 때문이다. 증폭기에 입력되는 입력펄스는 4.5 mJ이며, 첫 번째 증폭기에서 4.8 mJ의 출력은 광학소자에서 손실로 4.5 mJ로 감소하였다. 입사지점에서 입력 빔과 펌프 빔의 지름은 1.6 mm와 1.5 mm로 입력 빔의 지름이 약간 크며, 각 프리즘 쌍을 사용하여 5회 왕복시켰다. 실험에서 펌핑 빔과 입력펄스의 에너지 밀도가 높을수록 적은 통과횟수에서 포화현상을 볼 수 있다. 구성된 증폭기의 추출효율을 살펴보면, 첫 번째 4회 통과 증폭기에서 25 %이고, 두 번째 3회 통과 증폭기에서 34 %이며, 전체 시스템에서 펌핑에너지에 대한 전체효율은 18 %이다.

IV. 결 론

본 연구에서는 좁은 스펙트럼 선폭을 갖는 Ti:sapphire 레이저를 입력 빔으로 주입하였을 때, 다중통과 증폭시스템에 대한 포화특성을 해석하여 이론값과 비교함으로써 대출력 에너지를 얻기 위

한 증폭기 설계의 방향을 제시하였다.

각도-다중통과 방식의 2단 증폭기의 입력 빔으로 사용된 Ti:sapphire 오실레이터는 705~935 nm에 파장가변이 가능하고, 790 nm에서 최대 출력에너지는 0.3 mJ, 스펙트럼 선폭은 0.13 cm⁻¹을 갖는다. 특히, 각도-다중 방식의 다중통과 증폭기의 포화특성에 대한 해석을 통해 소신호 이득계수의 변화와 출력에너지의 포화점을 구하여 최적의 2단의 다중통과 증폭기를 구성하였다.

4회 통과된 첫 번째 증폭기의 추출효율은 25 %, 증폭이득은 12 dB, 최대출력 에너지는 4.5 mJ이었으며, 3회 통과된 두 번째 증폭기는 추출효율 34 %, 증폭이득 8 dB, 최대출력 에너지 22 mJ를 얻었다. 이때의 파장가변 범위는 705~935 nm이고 스펙트럼 선폭은 0.15 cm⁻¹이며, 펌핑에너지에 대한 전체효율은 18 %였다.

참고문헌

- [1] H. Maiman, "Stimulated optical radiation in Ruby," *Nature*, vol. 187, 493(1960).
- [2] J. C. Barnes, N. P. Barnes, and G. E. Miller, *IEEE. J. Quant. Electron.*, QE-24, No.6, June, 1029(1988).
- [3] P. Bado, M. Bouvier, and J. Scott Coe, *Opt. Lett.*, vol. 12, 319(1987).
- [4] J. V. Rudd, G. Korn, S. Kane, J. Squier, G. Mourou, and P. Bado, *Opt. Lett.*, vol. 18, 2044(1993).
- [5] A. Sullivan, H. Hamster, H. C. Kapteyn, S. Gordon, W. Hite, H. Nathel, T. J. Blair, and R. W. Falcone, *Opt. Lett.*, vol. 16, 1406(1991).
- [6] C. Le Blanc, G. Grillon, J. P. Chambaret, A. Migus, and A. Antonetti, *Opt. Lett.*, vol. 18, 140(1993).
- [7] W. Kochner, *Solid-State Laser Engineering*, 3rd edition(Springer- Verlag, Berlin,1992).
- [8] L. M. Frantz and J. S. Nodvik, *J. Appl. Phys.*, vol. 34, 2346(1963).
- [9] R. Bellman, G. Birnbaum, and W. G. Wagner, *J. Appl. Phys.*, vol. 34, 780(1963).
- [10] E. L. Steele, *J. Appl. Phys.*, vol. 36, 348(1965).
- [11] 이용우, 이주희, *한국광학회지*, vol. 7, 244 (1996, 9).
- [12] Yong Woo Yi, and Choo Hie Lee, *ICO'17 Optics for Science and New Technology*, 662(1996, 8).