

# 섬광등 펄프형 100 W급 4 중통과 Nd:YAG 증폭기 시스템의 증폭특성

고광훈<sup>†</sup> · 정도영 · 김재우 · 박상언 · 임창환 · 김철중

한국원자력연구소 양자광학기술개발부

Ⓣ 305-353 대전광역시 유성구 사서함 105

(2003년 5월 2일 받음, 2003년 8월 1일 수정본 받음)

수 kHz의 반복율로 발진하는 레이저광을 증폭하는 증폭기를 제작하고, 특성을 조사하였다. 증폭기로는 연속 방진하는 섬광등으로 펄핑되는 Nd:YAG 헤드를 사용하였고, 레이저 매질에서 발생하는 열 복굴절을 보상하여 이중통과 증폭기를 구성한 경우, 복굴절에 의한 레이저광 손실을 5%로 감소시켰다. 4 중통과 증폭기를 구성을 하였을 때, 반복율 5-10 kHz에서 이득은 약 3.2이었고, 펄스폭은 40 ns에서 48 ns로 20% 증가하였다.

주제어 : high repetition rate amplifier, 4 pass amplifier, thermally induced birefringence, Nd:YAG.

## I. 서 론

Nd:YAG 결정은 고출력 레이저에서 사용되는 대표적인 레이저 매질로써 산업체에서 사용하는 Nd:YAG 레이저의 출력은 수 kW에 이르고 있다. 레이저 매질을 펄핑하는 펄핑광과 이온화된 레이저광으로 사용하기 위하여는 펄스폭이 수십 ns 이하를 유지하여야 하는데, 수 kHz 이상의 반복율에서 수십 ns의 펄스폭을 유지하는 고출력 레이저에서는 열 문제때문에 현재에도 개발 단계에 있다.<sup>[1-3]</sup>

펄스폭이 60 ns 이하를 유지하고, 반복율 수 kHz에서 수십 kHz 이상의 레이저 펄스를 발생시키기 위한 방법으로 펄스 폭이 짧고 안정적인 레이저를 주공진기로 사용하고, 발진된 레이저광을 증폭하는 MOPA(Master Oscillator Power Amplifier) 시스템을 구성하는 방법이 있다. MOPA 시스템에서는 증폭기 에너지 변환효율이 높지 않지만 레이저광의 조건이 주공진기에 의존하기 때문에, 빔질이 좋은 레이저광을 얻는데 유리하다. 단일 통과 증폭 효율이 낮은 경우에는 이득 매질을 여러 번 통과시켜 큰 이득을 얻는 다중 통과 증폭 구성을 사용한 경우 편광성분이 있는 레이저광을 길이방향으로 긴 매질에서 증폭하고자 할 때에는 기하학적으로 4중 통과 증폭까지 가능하지만 그러나, 고출력 레이저 헤드에서는 이득 매질에서 방사열로 나타나는 온도변화에 의하여 열복굴절 현상이 발생하여, 이 현상에 의하여 다중 통과 증폭 효율이 현저하게 감소될 뿐만 아니라, 다중 펄스 출력을 보이기도 한다.<sup>[5-10]</sup>

다중 통과 증폭기에서 열복굴절을 보상하는 방법으로는 유선 트릴리앙 산란으로 발생된 위상 공액된 레이저광을 증폭기로 되돌려 열 복굴절을 보상하는 방법과 Relay Optics로 열복굴절을 보상하는 방법이 보고되어 있다.<sup>[11-15]</sup> 비선형 광학매질을 사용하는 위상공액과 발생 시스템은 반사효율이 입사하는 레이저빔 질의 영향을 많이 받을 뿐만 아니라, 반사율이 높지 않은 문제점이 있기 때문에 단일 통과 증폭 효율이 낮은 본

논문의 증폭기에서는 Relay Optics를 사용한 열복굴절 보상이 적절하다고 판단된다.

본 논문에서는 레이저 가공용으로 사용되는 CW 400 W 급(소비전력 10 kW)레이저의 레이저 헤드를 레이저 증폭기로 사용하였을 때의 증폭 특성에 대하여 논의하였다. 우선 단일 통과 증폭 특성에 대하여 논의하고, 레이저 헤드에서 발생하는 열복굴절효과와 열 복굴절을 보상하는 광학계 조건을 소개하고, 열복굴절 보상 광학계를 사용한 이중 통과 증폭 특성과 4 중통과 증폭 특성에 대하여 논의하였다.

## II. 이론적 배경

Nd:YAG는 YAG 결정에 Nd<sup>3+</sup> 이온을 도핑한 레이저 매질이다. YAG 결정은 열전도도(10-14 W/m°C)가 높기 때문에 고출력 레이저제작에 유리하며, Cubic, isotropic 결정구조를 가지고 있어서 레이저는 편광없이 발진된다. 실험에서 사용하는 주공진기 레이저의 펄스폭  $\tau_p$ 는 40 ns로써 레이저 전이전의 상위준위의 수명시간(약 240 s) 보다 아주 짧기 때문에, 입사 레이저 펄스가 증폭기를 통과하면서 증폭되는 레이저광 펄스 에너지는 다음과 같이 정리할 수 있다.<sup>[16,17]</sup>

$$E_{out} = fH_s \ln(1 + [\exp(E_{in}/fH_s) - 1]G_0) \quad (1)$$

$E_{in}$  = input energy

$E_{out}$  = output energy

$H_s = hv/\sigma$  saturation energy density

$G_0$  = small signal gain factor ( $e^{gV}$ )

$f$  = cross section of the laser beam

위 식에서 손실은 고려되지 않았고, 입사되는 레이저광의 펄스는 사각 펄스로 가정하였다. 식 (1)에서 입사 펄스 에너지가  $fH_s$  보다 아주 작은 경우( $E_{in} \ll fH_s$ )에는

$$E_{out} = G_0 E_{in} \quad (2)$$

으로 근사가 되고,  $fH_s$  보다 아주 큰 경우( $E_{in} \gg fH_s$ )에는

E-mail: khko@kaeri.re.kr

$$E_{out} = E_{in} + fH_{s}gl = E_{in} + hvNV \quad (3)$$

로 근사된다. 따라서, 입사 펄스에너지에 대한 출력 펄스에너지의 경향에서 입사 펄스에너지가 증가하면서 증폭기로부터 추출되는 에너지 포화가 예측된다.

펄스 레이저광이 매질을 통과하면서 매질의 열적 성질과 비선형 광학적 성질에 의하여 레이저광의 진행과 빔질(beam quality)이 변화한다. 고 반복율 레이저에서는 레이저 펄스의 침투세기가 낮으면서 매질내부에서의 발열량이 많기 때문에 레이저광의 진행은 레이저광의 침투세기에 의존하는 자기초점맺힘(self-focusing)보다 열효과에 의한 영향을 주도적으로 받는다. 내부에서 발생된 열이 레이저매질의 표면으로 발산될 때, 레이저 매질 내부에서는 온도 경사가 발생하고, 이것은 내부에서의 굴절을 변화를 발생시켜 레이저광의 편광 상태와 레이저 빔의 진행 특성을 변화시킨다.<sup>[10]</sup> 설파광등 펌프형 레이저 헤드의 경우 약 수 kW에서 수십 kW까지의 전기 에너지가 입력이 되고, 그 중 일부가 Nd:YAG 레이저 봉에서 레이저 발진 또는 증폭 에너지로 사용된다. 흡수된 에너지의 대부분은 흡수된 광에너지와 발진된 레이저광의 에너지 차이에 해당하는 Quantum Defect, 레이저 결정안의 불순물에 의한 발진 레이저 흡수, 양자 형광효율에 해당하는 상위준위로부터의 비방출 전이, 불순물에 의한 펌프레이저광의 흡수, ESA(Excited State Absorption) 등에 의하여 열에너지로 변환되어 레이저 결정의 온도를 높인다.<sup>[5]</sup> 레이저 매질을 냉각할 때, 원기둥 형태의 레이저 매질의 표면과 중심사이의 온도 변화가 발생하고, 수직성분의 편광을 갖는 레이저광이 입사하는 경우, 원주 방향( $\phi$ )과 반지름 방향( $r$ )의 편광에 대한 위상차이가 식 (4)와 같이 발생한다.

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} L(n(r) - n(\theta)) = C_r P_a (r/r_a)^2 \quad (4)$$

$C_r$ : -0.06 /W

$P_a$ : total heat dissipated in the rod

이 위상차이는 단면 위치마다 레이저광의 편광상태를 변화시켜, 편광상태를 사용하여 레이저광을 증폭하는 다중 통과 증폭 효율을 감소시킨다. 이러한 열 복굴절을 보상하는 방법에는 일반적으로 유도 브릴리앙 위상 공액 거울을 사용하는 방법과 Relay Optics를 사용하는 방법이 있다. Relay Optics를 사용한 방법은 레이저 매질을 통과시킨 후 편광성분을 90도 회전시키고, 다시 이득 매질의 같은 위치에 통과시켜 반지름방향 편광성분의 빔과 원주방향 편광성분의 빔의 위상지연을 똑같이 만드는 방법으로 복굴절을 보상하면서, 90도 회전된 편광상태의 빔을 얻는 방법이다. Relay-imaging은 증폭기의 복굴절을 보상함과 동시에 증폭기를 통과하는 레이저광이 올바르게 진행하도록 만들어주어, 회절(diffraction)링이 증폭기의 측면을 손상시키는 것을 방지하게 하는 역할과 열 렌즈(Thermal lensing)에 의한 손상위험을 줄이는 효과를 얻을 수 있다.<sup>[7,9,10]</sup> SBS cell을 사용한 방법과 비교하여 광학계 구성이 복잡하지만 반사 손실이 적기 때문에 펌핑 에너지가 상대적으로 작은 고반복율 증폭기에서 유용한 방법이다. 한 개의 증폭기 헤드를 사용한 증폭기에서는 Faraday Rotator와 거울을 사용하여 열복

굴절(Thermally Induced Birefringence)을 보상하고, 2단 증폭기에서는 90도 편광 회전판과 이미지 광학계를 사용하여 열복굴절을 보상한다.<sup>[10]</sup>

### III. 실험 장치

주 발진기는 DPSSL(diode pumped solid state laser)로써 레이저 헤드 두 개와 AO modulator(acousto-optic modulator)로 이루어져 있다. 헤드를 펌핑하는 다이오드 레이저는 IMC사의 제품이며, 각각의 헤드에 약 500 W의 전기에너지가 일정하게 공급된다. AO modulator와 드라이버는 Gooch-Housego Company사의 제품으로 드라이버의 출력은 100 W이고 주파수는 27.12 MHz 이다. 이 공진기에서 출력되는 레이저광의 출력은 연속 발진할 경우 약 85 W이며, 10 kHz의 반복율을 갖는 펄스 동작에서는 평균 출력 약 80 W(8 mJ, 펄스폭 40 ns)이고, 6 kHz의 반복율 동작에서는 평균 출력 약 60 W(10 mJ, 펄스폭 40 ns)를 얻을 수가 있다.

증폭기에 사용한 이득 매질은 Nd:YAG 결정으로 길이 162 mm, 직경 7 mm이며, 레이저에 의한 손상을 방지하도록 Nd:YAG 결정의 앞뒤에 직경 6.8 mm의 aperture가 있다. Nd:YAG 결정의 도핑 농도는 약 0.6 wt.%이다. 펌핑은 소모전력 5 kW급 연속 방전 설파광등 2개로 양쪽방향에서 펌핑된다.

위의 증폭기 헤드를 사용한 4중 통과 증폭기의 개략도를 그림 1에 나타내었다. 레이저 발진기에서 나온 레이저빔을 Faraday Rotator(FR1)와 편광기(TFP1, TFP2)로 이루어진 Isolator를 통과시킨 후 증폭기에 입사시킨다. 열 복굴절을 보상시키면서 다중 통과 증폭 조건을 만족시키기 위하여 Faraday Rotator(FR2)와 렌즈를 통과시키고, 전반사 거울로 되반사시킨다. 증폭기 끝단에서부터 렌즈까지의 거리를  $l_1$ , 렌즈와 전반사 거울까지의 거리를  $l_2$ , 렌즈의 초점거리를  $f(=300\text{ mm})$ , 레이저 증폭기의 레이저 매질 Nd:YAG 결정의 길이를  $l_{Nd:YAG}(=162\text{ mm})$ , 굴절율은  $n_{Nd:YAG}(1.82)$ , Faraday Rotator의 매질 길이를  $l_{TGG}(=39\text{ mm})$ , Faraday Rotator 매질인 TGG(Terbium Gallium Garnet)의 굴절율이  $n_{TGG}(1.95)$ 라고 할 때, 매질의 이미지를 레이저 헤드에 맺히도록하는, 다음 식의 보상 조건으로 광학계를 구성하였다.

$$l_1 = f \quad (8)$$

$$l_2 = f \frac{l_{Nd:YAG}}{2n_{Nd:YAG}} - \frac{l_{TGG}}{n_{TGG}} \quad (9)$$

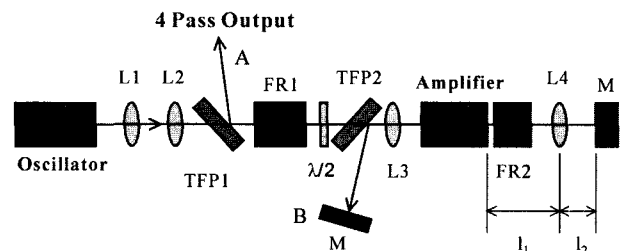


그림 1. 4중 통과 증폭기의 구조. TFP: Thin Film Polarizer, L: lens, M: Mirror, FR: Faraday Rotator,  $\lambda/2$ :  $\lambda/2$  plate.

이 식은 Nd:YAG 레이저 매질 안에서 생긴 열 복굴절에 의해 회전된 편광을 Faraday Rotator를 사용하여 90도 회전시킨 뒤 증폭기내부에 상이 맺히도록 하는 조건이다.<sup>[10,12]</sup> 2 중통과 증폭된 빔은 B 위치에서 얻을 수 있고, 4 중통과 증폭된 빔은 B 위치에 거울을 두어 다시 증폭기를 두 번 통과한 뒤 A 위치에서 출력을 얻는 구조로 되어있다.

#### IV. 실험 결과

그림 2는 편광된 He-Ne 레이저광을 선펠등 증폭기에 통과시킨 후 Analyzer를 통과시켰을 때 나타나는 공간적 빔모양이다. 편광된 He-Ne 레이저광은 증폭기를 통과한 후 PBS(Polarizing Beam Splitter)에 의하여 각각의 편광성분으로 나뉘었고, 입사 편광과 수직인 편광 성분을 2000 mm 후에 스크린을 두어 CCD 카메라와 Power meter로 열효과에 의한 공간적 빔모양과 세기 변화를 측정하였다. Analyzer를 통과한 후 레이저 세기는 증폭기에 의하여 발생하는 편극소거(Depolarization)를 나타내며, 그림 3과 같이 입력 전기에너지에 따라 세기에 대하여 약 17%의 세기가 관측되었다. 레이저 이득 매질 내부에서의 온도 경사가 커지면서 열렌즈에 의한 집속이 두드러지게 관측되었으며, 약 7 kW에서 약 3 Diopter가 측정되었다. 증폭기 시스템은 약 8 kW에서 동작하기 때문에, 다중 통과 증폭기를 구성할 경우에 열효과 보상이 필수적이다.

단일 통과 증폭 장치는 주 발진기에서 발진되는 레이저광을 렌즈 및 거울 등 광학계를 사용하여 레이저광의 빔크기를 증폭기의 aperture 크기 이하가 되도록 입사 레이저광의 직경을

조절하여 증폭기에 입사시킨다. 모든 광학계의 표면에는 레이저 발진 파장에 대한 무반사 코팅이 되어있다. 주 발진기에서 발진되는 레이저광은 편광이 없이 입사시키는 경우, 반복율 10 kHz에서 입사 레이저 펄스 에너지를 0 mJ에서 8 mJ까지 변화시킬 수 있었고, 6 kHz의 반복율인 경우에는 0 mJ에서 10 mJ까지 입사 레이저 펄스 에너지를 변화시킬 수 있었다. 각각의 경우 입사 레이저 세기에 대하여 증폭된 레이저광의 세기는 입력 세기의 약 1.5배가 되었으며, 입사레이저광의 세기에 대하여 비례하는 결과를 얻었다.

반복율 4 kHz에서 10 kHz까지의 변화에서 단일 통과 증폭기의 증폭율( $I_{out}/I_{in}$ )은 약 1.5로 펄스 에너지에 따라서 변화하지 않았다. 펄스 반복율이 4 kHz인 경우에는 주공진기 레이저 펄스의 에너지가 15 mJ였고, 이 때의 단일 증폭된 펄스에너지는 22 mJ이었다. 펄스 반복율이 10 kHz인 경우에는 약 8 mJ의 입사 펄스에너지에서 12 mJ의 출력 펄스에너지가 측정되었다. 증폭기의 입력 전기에너지에 대한 증폭율은 선형적으로 나타났으며, 이와 더불어 열 렌즈(thermal lens)의 영향은 입력 전력에 비례하여 증가하였다. 그림 4(a)는 반복율 6 kHz인 경우 작은 입사펄스에너지에 대한 증폭된 펄스 에너지를 나타내었고, 그림 4(b)는 입사 펄스에너지가 4 mJ인 경우에 증폭기에 입력되는 전력에 대한 증폭된 펄스 에너지를 나타내었다.

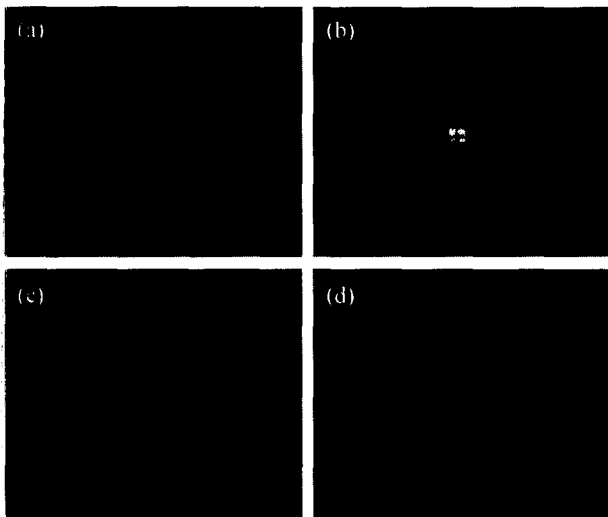


그림 2. 편광된 He-Ne 레이저광을 선펠등 증폭기에 통과시켰을 때 나타나는 열복굴절 현상. 증폭기를 통과한 He-Ne 레이저광은 PBS(Polarizing Beam Splitter: Analyzer)에 의하여 각각의 편광성분으로 나뉘었고, 2000 mm 후에 스크린을 두어 CCD 카메라로 beam profile을 측정하였다. He-Ne 레이저 편광은 입사 편광과 수직인 성분이다. 사진은 입력 전력 각각 (a) 0 kW, (b) 2.6 kW, (c) 4.5 kW, (d) 7.0 kW인 경우의 공간적 레이저 빔 모양이다.

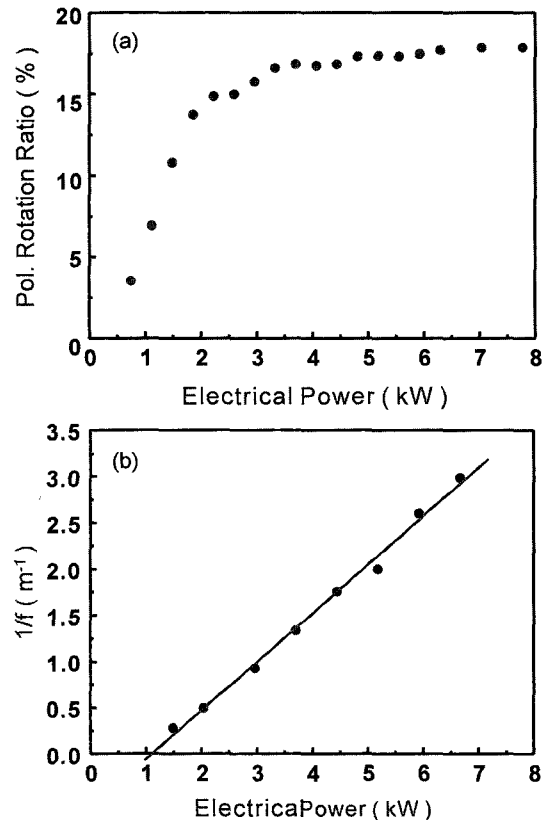


그림 3. 레이저 파장 632.8 nm에서의 열 복굴절에 의한 편극소거(depolarization). 레이저 증폭기를 레이저광이 통과할 때 입사되는 레이저의 편광과 수직인 성분의 레이저광 세기비율 (a). He-Ne 레이저광을 사용한 경우의 열렌즈 효과에 의한 초점 맺힘 (b).

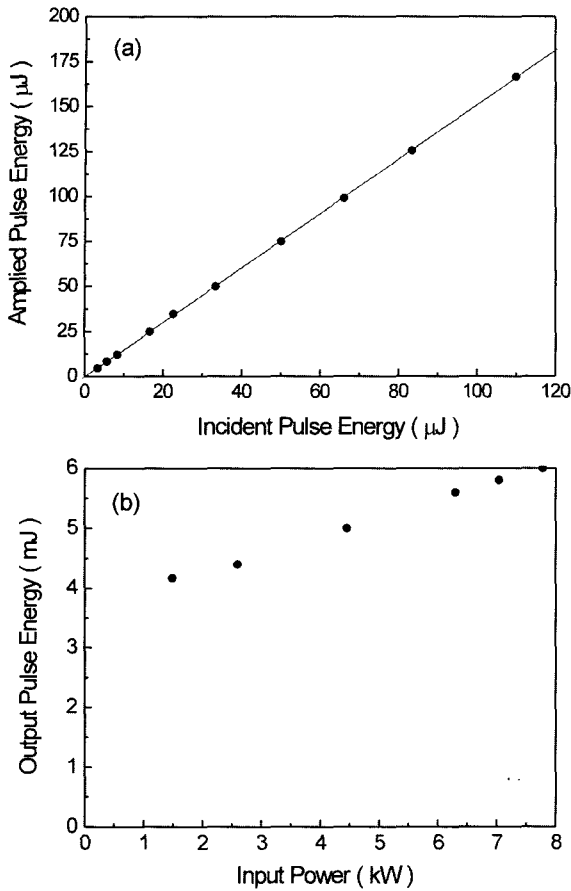


그림 4. 반복율 6 kHz인 경우 작은 입사펄스에너지에 대한 증폭된 펄스에너지 (a), 입사 펄스에너지가 4 mJ인 경우에 증폭기에 입력되는 전력에 대한 증폭된 펄스 에너지 (b).

다중 통과 증폭기를 구성할 때에는 B의 위치에서 레이저광 세기를 측정하면서 FR1(Faraday Rotator1)로 되돌아가는 레이저광이 최소가 되고, 그림 1의 편광판2(TFP2)에서 반사되는 레이저광 세기가 최대가 되도록 렌즈와 거울의 위치를 마이크로미터를 사용하여 미세하게 조절하였다. 그림 1에서 B 위치의 거울을 제거한 2 중통과 증폭기를 구성한 경우에, Faraday Rotator2와 wave plate를 사용하여 보상 특성을 비교하였다.

증폭기의 출력이 작은 경우에는 두 경우에 차이가 없지만 출력이 큰 경우에는 레이저 헤드의 복굴절에 의하여 Faraday Rotator를 사용한 경우에만 복굴절이 보상되었다. 10 kW의 레이저 헤드를 사용한 증폭기에서 출력( $I_{out}$ )과 손실( $I_{leak}$ )은 출력비를 측정 한 결과,  $\lambda/4$  wave plate를 사용한 경우의 이중통과 증폭기에서 약  $I_{out} : I_{leak} = 60:40$ 의 비율로 손실이 발생하였다. 이 구조에서  $I_{out}$ 의 레이저광을 거울과 렌즈를 사용하여 다시 반사시켜 증폭기를 다시 통과하도록 구성하면,  $\lambda/4$  wave plate를 사용한 4 중통과 증폭기가 된다. 이 구조에서는 복굴절에 의한 다중펄스가 발생할 뿐만 아니라 증폭기에서 연속발진이 일어난다. Faraday Rotator를 사용한 경우의 이중통과 증폭기에서는 편극소거(depolarization) 비율이 5%로 감소하였으며 이중통과된 출력은 입사된 레이저 펄스에너지에 대하여 선형적으로 증가하여 이중통과 증폭율은 단일통과 증폭율의 제곱

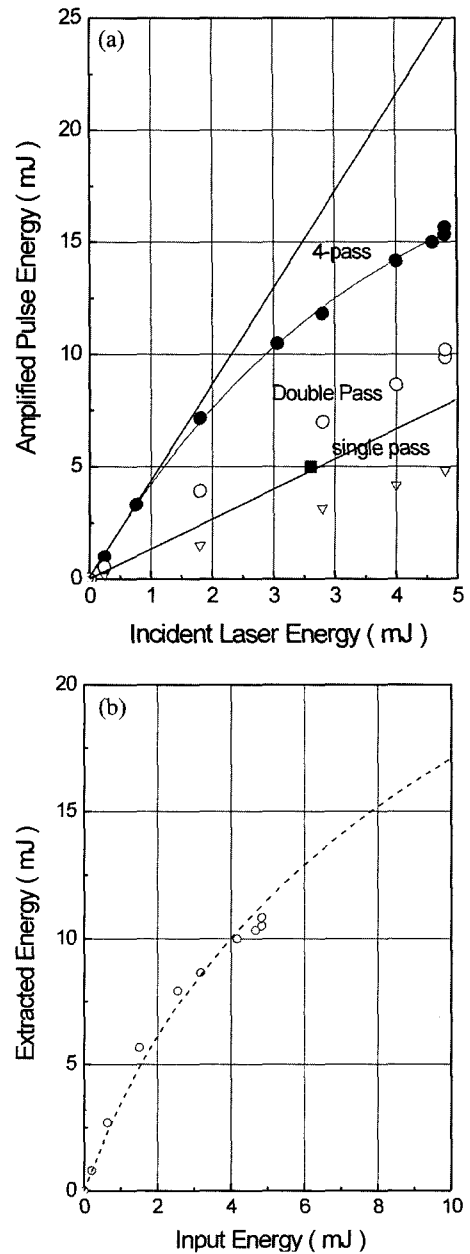


그림 5. 6 kHz의 반복율에서 단일 통과, 2중 통과, 4중통과 증폭특성의 비교 (a). 입사 펄스에너지에 대한 증폭기로부터의 추출 에너지. 파선은 증폭기를 통과하는 레이저광의 직경이 6.0 mm인 경우에 기대되는 4 중통과 증폭에서의 추출 에너지 (b).

인 약 2.17 정도가 되었다.

그림 5(a)는 반복율 6 kHz로 동작할 때, 주공진기의 레이저 세기와 단일 통과 증폭 특성, 이중통과 증폭특성, 그리고 그림 2의 4 중통과 증폭구조에서의 4 중 통과 증폭특성을 함께 나타내었다. 실선은 반복율이 6 kHz일 때 단일 통과 증폭 특성을 사용하고, 포화현상이 없다고 가정한 경우에 기대되는 4 중 통과 증폭특성이다. 입사되는 레이저광의 펄스 에너지는 최대 약 5 mJ이었으며, 펄스 폭은 약 40 ns이었다. 이중 통과 증폭은 단일 통과 증폭과 마찬가지로 입사 출력에 비례하였지만,

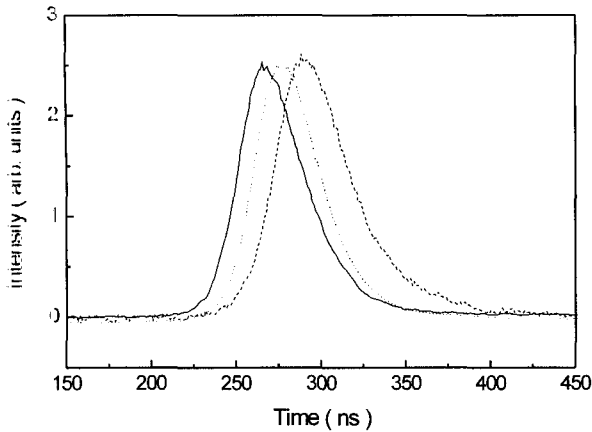


그림 6. 입사 레이저 펄스의 펄스폭과 다중 통과 증폭기를 통과한 후의 펄스폭과 시간 지연. 입사 펄스에너지는 5 mJ, 증폭기의 소비전력은 약 7.5 kW이다. 실선은 입사 레이저 펄스, 점선은 이중통과 증폭된 펄스, 파선은 4중통과 증폭된 펄스.

다중 통과 증폭에서는 포화현상을 보이면서 16 mJ의 최종 펄스 에너지를 얻을 수 있었다. 이때의 증폭율은 약 3.2이었다. 이 결과는 증폭기에 입력되는 전력 7.5 kW(전류 24 A)인 경우의 결과이다. 입력 전력을 약 8.5 kW(전류 26 A)로 증가하였을 경우에는 출력이 증가하여 약 19 mJ의 최종 출력을 얻을 수 있었다. 증폭기 입력 전력이 7.5 kW인 경우에 증폭기로부터 추출된 에너지를 입사에너지에 대하여 나타내면 그림 5(b)와 같이 나타낼 수 있다. 파선은 식 (1)과 단일 통과 이득 계수를 사용하여 4 중통과 증폭에 적용한 것으로 레이저 빔의 직경이 6 mm인 경우, 실험결과와 정성적으로 일치하는 것을 알 수 있다.

그림 6은 주 공진기의 펄스 파형과 이중 통과 증폭기를 통과한 후의 펄스 파형과 사중 통과 증폭기를 통과한 후의 펄스 파형을 보여준다. 증폭기를 따라 진행되는 거리만큼 펄스 지연이 생기고 있고, 펄스 폭은 입사레이저광 펄스의 펄스폭과 ns(반복율 6 kHz)에서 4중 통과 증폭기를 지난 후에 레이저 펄스폭이 48 ns로 증가되었다. 레이저 펄스가 증폭기의 단면을 통과하는 위치에 따라 펄스 지연의 차이가 측정되었고, 이것이 펄스폭이 증가된 주된 원인으로 해석되었다. 이와 더불어 열 부하가 보상되지 않은 레이저광이 증폭기 내부를 반복하여 통과하여 발생한 것으로 판단된다.

**V. 요약 및 결론**

Nd:YAG를 이득매질로 하는 MOPA(master oscillator power amplifier)를 구성하고, 증폭기의 단일 통과 증폭 특성과 다중 통과 증폭 특성에 대하여 조사하였다. 소비전력 10 kW급 섬광등 펄프형 Nd:YAG 레이저 헤드를 고효율 고반복율 레이저 펄스의 증폭기로 사용하고자 할 때, 단일 통과 증폭은 증폭율이 어느 정도로 매우 낮아서 3-10 mJ의 에너지를 갖는 주공진기의 레이저 펄스의 증폭에는 효율적이지가 않다. 이 증폭기에서 에너지 추출 효율을 높이기 위하여는 레이저 매질을 여러번 반

복하여 통과시키는 증폭 구조가 필요하였고, 봉 형태의 길이가 긴 레이저 매질에서는 기하학적으로 4번의 통과가 가능하며 4번 통과 증폭에 필요한 편광 보존과 편광 보존 조건, 증폭 특성에 대하여 조사하였다.

다중 통과 증폭기에서는 편광 특성을 사용하기 때문에, 편광 상태를 변화시키는 열 부하 문제의 선행 특성 조사 및 부하 문제를 최소화하는 방안이 고려되어야 한다. 대표적인 부하 보상 방법은 위상 공액 거울을 사용하는 방법과 Relay Optics를 사용한 방법이 있으나, 실험에서의 고반복율 레이저에서는 입사 레이저광 펄스 에너지가 작고, 증폭기에 입사하는 단위 펄스당 에너지가 작기 때문에, 손실이 없는 Relay Optics를 사용한 방법을 사용하였다.

이중 통과 증폭기 구조에서 열 부하 문제 보상을 광학계를 사용한 결과 부하에 의하여 발생하는 손실이 5%로 개선되었다. 주공진기에서 발진된 레이저광의 M2 값은 약 <20으로 주공진기의 빔질이 개선되면 손실량이 더욱 감소할 것이다. 열효과를 보상한 4중통과 증폭기는 반복율 6 kHz에서 5 mJ의 입사 레이저광 에너지에 대하여 출력은 약 16 mJ(소비전력 7.5 kW)로 증폭율은 약 3.2이었고, 증폭기의 입력전력을 높였을 경우(전력 : 8.5 kW)에는 19 mJ의 증폭된 펄스 에너지를 얻을 수 있었다. 입사 펄스 에너지가 더욱 크면 증폭기로부터의 에너지 추출이 효율적으로 이루어지지만, 추출 에너지는 포화되는 것으로 관측되었다. 증폭기에서 추출된 레이저 펄스 에너지가 반복율에 따라 약  $\Delta E = 9-17$  mJ로 측정되었고, 이것은 섬광등 펄프형 증폭기를 사용하여 보다 큰 에너지를 얻기 위한 다단 레이저 증폭기를 구성하는데 사용될 것이다.

**감사의 글**

본 연구는 과학기술부에서 시행하는 원자력 중장기 사업의 지원으로 수행되었습니다.

**참고문헌**

- [1] H. Kirriyama, T. Yoshida, M. Yamanaka, Y. Izawa, T. Yamanaka, S. Nakai, T. Kanzaki, H. Miyajima, M. Miyamoto, and H. Kan, "Demonstration of high energy-extraction efficiency in a novel laser-diode pumped eight-pass Nd:YAG zig-zag slab amplifier," *Fusion Engineering and Design*, vol. 44, pp. 419-442, 1999.
- [2] S. Amano, A. Shimoura, S. Miyamoto, and T. Mochizuki, "Development of a high repetition rate Nd:YAG slab laser and soft X-ray generation by cryogenic target," *Fusion Engineering and Design*, vol. 44, pp. 423-426, 1999.
- [3] Y. Tzuk, Y. Glick, and M. Tilleman, "Compact ultra-high gain multi-pass Nd:YAG amplifier with a low passive reflection phase conjugate mirror," *Opt. Commun.* vol. 165 pp. 237-244, 1999.
- [4] E. S. Lee and J. W. Hahn, "Four-pass amplifier for the pulsed amplification of a narrow-bandwidth continuous-wave dye laser," *Opt. Lett.*, vol. 21, pp. 1836-1838, 1996.
- [5] Walter Koechner, *Solid-State Laser Engineering* (Springer-

- Verlag, New York, 1976), p. 355.
- [6] H. L. Offerhaus, H. P. Godfried, and W. J. Witteman, "All solid-state diode pumped Nd:YAG MOPA with stimulated Brillouin phase conjugate mirror," *Opt. Commun.* vol. 128, pp. 61-65, 1996.
- [7] K. G. Han and H. J. Kong, "Four-Pass Amplifier System Compensating Thermally Induced Birefringence Effect, Using a Novel Dumping Mechanism," *Jpn. J. Appl. Phys.* vol. 34, no. 8a, pp. L994-L996, 1995.
- [8] 이동원, 이성구, 박승현, 공홍진, "유도 브릴루앙 산란 위상 공액 거울을 이용한 Nd:YAG 레이저 발진기의 출력 특성," *한국광학회지* vol. 13, no. 6, pp. 548-553, 2002.
- [9] Hans J. Eichler, A. Haase, R. Menzel, and A. Siemoneit, "Thermal lensing and depolarization in a highly pumped Nd:YAG laser amplifier," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 26, pp. 1884-1891, 1993.
- [10] Q. Lu, N. Kugler, H. Weber, S. Dong, N. Muller, and U. Witrock, "A novel approach for compensation of birefringence in cylindrical Nd:YAG rods," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 28, pp. 57-69, 1996.
- [11] C. B. Dane, L. E. Zapata, W. A. Neuman, M. A. Norton, and L. A. Hackel, "Design and Operation of a 150 W Near Diffraction-Limited Laser Amplifier with SBS Wavefront Correction," *IEEE J. Quantum Electronics*, vol. 31, pp. 148-163, 1995.
- [12] H. J. Eichler, A. Haase, and R. Menzel, "100-W Average Output Power 1.2 Diffraction Limited Beam from Pulsed Neodymium Single-Rod Amplifier with SBS Phase Conjugation," *IEEE J. Quantum Electronics*, vol. 31, no. 8, pp. 1265-1269, 1995.
- [13] D. S. Sumida, D. Cris Jones, and D. A. Rockwell, "An 8.2 J Phase-Conjugate Solid-State Laser Coherently Combining Eight Parallel Amplifiers," *IEEE J. Quantum Electronics*, vol. 30, no. 11, pp. 2617-2627, 1994.
- [14] D. A. Rockwell, "A Review of Phase-Conjugate Solid-State Lasers," *IEEE J. Quantum Electronics*, vol. 24, no. 6, pp. 1124-1140, 1988.
- [15] N. F. Andrew, E. Khazanov, and G. A. Pasmanik, "Applications of Brillouin Cells to High Repetition Rate Solid-State Lasers," *IEEE J. Quantum Electronics*, vol. 28, no. 1, pp. 330-341, 1992.
- [16] Reinhard Ifflander, *Solid-State Lasers for Materials Processing* (Springer-Verlag, New York, 2001), p. 9.
- [17] W. H. Lowdermilk and J. E. Murray, "The Multipass amplifier: Theory and numerical analysis," *J. Appl. Phys.* vol. 51, no. 5, pp. 2436-2444, 1980.

### 100 W class flash lamp pumped single stage Nd:YAG Amplifier

Kwang-Hoon Ko<sup>†</sup>, Do-Young Jeong, Jaewoo Kim, Sang Eon Park,  
Changhwan. Lim, and Cheol-Jung Kim

Laboratory for Quantum Optics, Korea Atomic Energy Research Institute, Yusong, Dajeon, P.O.Box 105

<sup>†</sup>E-mail: khko@kaeri.re.kr

(Received May 2, 2003, Revised manuscript August 1, 2003)

Characteristics of an amplifier with repetition rate of a few kHz is investigated. The continuous flash lamp pumped Nd:YAG laser head is used as an amplifier. The thermally induced birefringence of the laser medium is compensated and the depolarization is reduced to 5% in a double-pass amplifier. The amplification factor of a four pass amplifier reaches to about 3.2 at the repetition rate 5-10 kHz and the pulse width is lengthened from 40 ns to 48 ns.

OCIS Codes : 140.3280, 140.3580, 140.6810.