

Nd:YLF 레이저 펄스의 재생식 증폭

김달우

산업과학기술연구소 물리연구그룹

M. Saeed and L. F. DiMauro

Brookhaven National Laboratory, Upton, N.Y. 11973, U.S.A.

(1991년 10월 9일 받음)

공진기 내에서 종자펄스(seed pulse)를 여러번 왕복시키며 증폭시키는 재생식 증폭기의 설계 및 동작 특성에 대하여 연구하였다. 기계적, 열적 요동에 대하여 안정된 작동을 하도록 Nd:YLF 레이저 매질로 사용하고, 광학 부품에 미치는 에너지 밀도를 최소화할 수 있도록 오목거울과 볼록거울로 구성된 증폭기 공진기를 설계, 제작하였다. 종자펄스로는 펄스 폭 40 ps, 에너지 100 pJ, 파장 1.053 μm 인 Nd:YLF 레이저 펄스를 사용하여 재생식 증폭기로 최대 반복률 3.5 kHz에서 1 mJ의 안정된 펄스를 얻었으며, 최대 출력은 5 mJ 이었다.

I. 서 론

고출력 레이저는 비선형 광학의 영역에서 여러가지 새로운 현상을 일으킨다. 특히, 고강도 레이저장에서의 원자 및 분자는 다광자 이온화(multiphoton ionization), ATI(above-threshold ionization), ATD(above-threshold dissociation) 등의 현상을 나타내며 이러한 경우, 신호 평균(signal averaging)을 통해서 신호대잡음비(S/N ratio)를 증가시키기 위해서는, 고반복률의 레이저가 요구된다. 가장 기본적인 신호대잡음비는 계수된 신호의 제곱근에 비례하므로 원리적으로는 장시간동안 계수함으로써 임의로 높은 정밀도를 얻을 수 있으나, 실제로는 장시간 계측에 의해서 실험 시스템의 불안정성이나 신호에 새로운 불확실성의 근원을 도입하는 결과가 된다. 따라서, 비교적 짧은 시간 동안에 통계적으로 의미있는 신호를 축적하여 신호평균을 하기 위해서는 고반복률 레이저 시스템이 필요하다. 일반적으로 고체 레이저에서 고출력 펄스를 얻기 위해서는 대형의 레이저 붐을 사용하기 때문에 고반복률로 작동시킬 경우는 고체 레이저 매질을 충분히 냉각시켜 줄 수 없어 열적인 문제점이 발생하게 되므로 반복률에 제한을 받게 된다. 최근에는 고출력, 고반복률을 얻기 위해 결합된 종자펄스(mode-locked seed pulse)를 공진기 내에서 여러번 왕복시켜 증폭시키는 재생식 증폭기(regenerative amplifier)¹⁾가 고안되어 Nd:YAG 레이저에 적용되고 있다.²⁾ 재생식 증

폭기의 작동은 일련의 결합된 펄스로 부터 한개의 레이저 펄스를 선택하여 증폭기 내에 주입시키므로써 시작된다. 이 펄스는 재생식 증폭기의 공진기내 이득곡선 형성 시간과 동기화되어 공진기 내를 여러번 왕복하며 증폭되어 최대 이득에 도달 하였을 때 공진기 내의 모든 에너지는 증폭된 펄스의 상태로 재생식 증폭기로 부터 방출된다. 재생식 증폭기는 Nd:YAG 레이저와 아울러 물리적 및 광학적 성질이 우수한 Nd:YLF(YLiF₄) 레이저에 적용된 것도 보고된 바 있으나^{8,11)} 반복률이 수백 Hz에 그쳐 보다 큰 펄스 반복률의 레이저 시스템이 요구된다. 본 논문의 II절에서는 재생식 증폭기의 원리 및 특성을 기술하였고, III절에서는 반복률이 통상의 레이저 시스템보다 훨씬 더 큰 수 kHz인 재생식 증폭기가 안정되게 작동하고 공진기 내에 있는 광학 부품들이 손상을 입지 않게 하기 위한 재생식 증폭기의 설계 및 제작에 대해 논하였으며, 제작된 증폭기의 출력 특성을 IV절에서 설명하고, V절에서 결론을 맺었다.

II. 재생식 증폭기의 원리

재생식 증폭기는 1/4-판(quarter-wave plate)과 Pockels cell에 의하여 작동되며 4개의 단계로 대별된다. 첫째, 증폭기 공진기(amplifier resonator)에서 결합된 종자펄스의 집단으로 부터 한 개의 펄스를 주입한다. 둘째, 이와 동시에 증폭기 발진기를 Q-변환한다. 셋째,

종자펄스를 공진기 내에서 $N(N>2)$ 번 왕복하게 함으로써 주입된 펄스가 Q -변환 곡선 하에서 이득을 형성하도록 한다. 넷째, 이득곡선의 포화상태에서 증폭된 펄스를 cavity dumping을 통하여 방출한다.

이와같이 재생식 증폭기는 펄스를 증폭시키기 위하여 Q -변환 방법을 사용하지만 일반적으로 레이저 펄스가 공진기 내를 한번 왕복하며 증폭되는데 반해 재생식 증폭기는 한개의 종자펄스가 공진기 내를 여러번 왕복하며 증폭된다. 따라서, 재생식 증폭기는 공진기 내에서 펄스의 1회 왕복에 따른 이득은 작지만 종자펄스가 공진기에서 얻는 총이득은 대단히 크다. 또한, 재생식 증폭기는 걸잡긴 레이저 발진기로부터 주입된 종자펄스의 다중 왕복에 의하여 이득을 구할 수 있어야 하고, 안정되고 높은 Q 값을 갖는 공진기가 요구된다. 이러한 공진기는 광학계의 구성, 이득 매질의 특성, 작동 모드등에 따라 큰 영향을 받게된다.

또한, 재생식 증폭기는 연속 또는 펄스형의 플래쉬 램프를 사용하여 펌핑한다. 우선 Q -변환이 시작되고 나서 최대 이득에 도달할 때까지의 시간, 즉 Q -변환 형성 시간을 T_b 라 하면^[12]

$$T_b \sim \frac{25}{r-1} \frac{T}{\delta}$$

여기서 r 은 Q -변환이 일어날 때의 초기 밀도반전과 Q -변환이 일어난 후의 임계변환(threshold inversion)의 비율, T 는 증폭기 공진기 내에서 펄스의 왕복 이동시간, δ 는 공진기의 손실에 의한 왕복 운동당 출력 손실률이다. 전형적인 재생식 증폭기의 경우, $T \approx 10$ ns, $\delta \approx 0.1$ 이며 r 은 펄스의 경우 약 200, 연속파의 경우 약 4이다.^[12] 따라서, 펄스 형태의 펌핑보다 연속 펌핑의 경우는 Q -변환 형성 시간이 훨씬 길다. 이와같이 연속 펌핑의 경

우는 종자펄스가 증폭기 내에 머무는 시간이 길어져 펌프의 출력과 공진기 불안정성에 의한 영향을 적게 받으므로 레이저 빔의 모드 특성과 출력 안정성이 좋다. 연속 펌핑의 또 다른 장점은 펄스형 전력 공급장치(power supply)가 필요 없는 것이며, 반복률은 단지 전기 광학적 물질(electrooptic material)에 의해서만 제한된다. 따라서, 고반복률에는 연속형의 펌핑이 유리하다. 또한 출력 펄스의 특성인 레이저 펄스의 폭, 에너지, 반복률 등은 사용한 레이저 매질의 밴드 폭, 열전도도, 방사수명(radiative lifetime) 등에 영향을 받으며 특히, 고반복률로 작동될 때는 열전도도가 큰 물질이 요구된다. 일반적으로 Nd:YAG가 레이저 매질로 많이 사용되어 왔으나, 광학적으로 균일한 이득 매질에서는 열적인 편극 소거(depolarization) 문제점이 발생될 뿐 아니라 열전도도가 작아 열이 효율적으로 방출되지 않는다. 이에 반해 Nd:YLF는 넓은 밴드 폭과 긴 수명을 가지고 있을 뿐 아니라 열전도도가 $6 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ 로 비교적 크므로 효율적으로 방열되며 열렌즈 효과(thermal lensing)^[11]가 작다. 또한, 자연적인 복굴절성(natural birefringence)이 크므로 열에 의해 발생된 복굴절성이 무시될 수 있고 YAG나 유리 등과 같은 광학적 균일 물질(optically isotropic host)의 열적인 편극 소거 문제가 발생되지 않으므로 재생식 증폭기에 아주 적합한 레이저 매질임을 알 수 있다(Table 1).

III. 재생식 증폭기의 설계 및 제작

재생식 증폭기는 그림 1과 같이 공진기, YLF봉, Pockels cell, 두개의 편광판, 원주형 렌즈, 반사경, Faraday isolator 등으로 구성되어 있다. 그림에 나타난 바와 같이 편광판을 통하여 주입되는 종자펄스는 공진기 내에서 레이저 매질인 YLF 봉을 여러번 왕복하여 최대 이득에

Table 1. Physical properties of Nd³⁺ doped laser materials.

	Glass	YAG	YLF
Optical class	isotropic	isotropic	uniaxial
Line width (nm)	21.2	4.5	13.5
Wavelength (nm)	1054	1064	1053 (σ) 1047 (π)
Stimulated emission cross-section (cm ²)	4.4×10^{-20}	3.4×10^{-19}	2.6×10^{-19} (σ) 3.7×10^{-19} (π)
Fluorescence life time (μsec)	190	244	480
Energy storage	high	low	medium
Thermal conductivity (w/m $^\circ\text{C}$)	0.7	10	6
Thermal birefringence	medium	high	low
Thermal lensing	moderate	strong	low
Emission	unpolarized		polarized

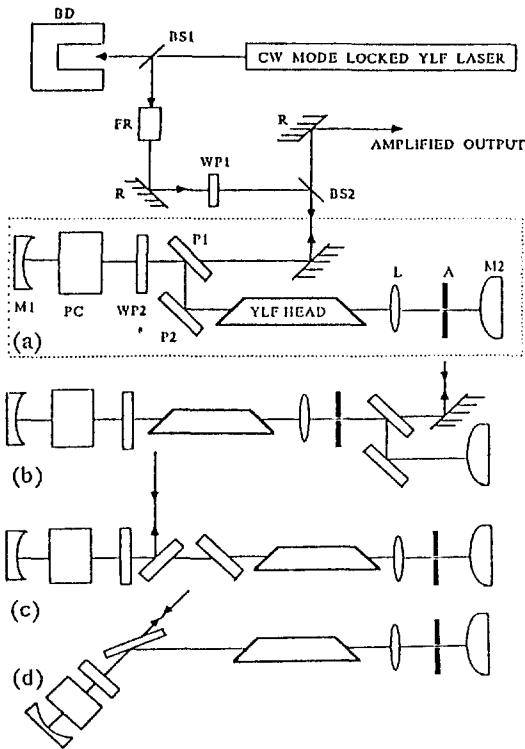


Fig. 1. Block diagram of the regenerative amplifier system (A: aperture, BD: beam dump, BS1 and BS2: beam splitters, FR: Faraday rotator, M1: concave mirror, M2: convex mirror, P1 and P2: Brewster angle polarizers, PC: Pockels cell, R: reflector, WP1: halfwave plate, WP2: quarter-wave plate).

도달한 후 출력되는데 이를 위한 광학계의 배열은 그림 1(a)-(d)의 여러가지가 가능하다. 이들중 공진기 내의 광학부품을 보호하기 위하여 손상문턱(damage threshold)이 낮은 Pockels cell, 편광판 등의 광학부품은 레이저 빔 직경이 큰 쪽에 배치하는 그림 1(a)의 방식을 택했다. 또한, 공진기는 그림 2(a)-(f)의 여러 형태중 빛의 전파 방향으로 레이저 광선의 각도(taper)가 주어져 오목거울 쪽의 빔 직경이 최대가 되도록 그림 2(e)의 공진기 배열을 택하였으며 반사율 99%의 오목거울을 반사경, 반사율 98%의 볼록거울을 출력경으로 사용하였다.

종자펄스로는 연속 펌핑된 결잠긴 레이저(cw pumped mode-locked laser)에서 나오는 펄스폭 40 ps, 에너지 80 nJ, 파장 1.053 μm 인 Nd:YLF 레이저(Quantronix model 496) 펄스를 사용하였다. 종자펄스의 편광 및 입사 에

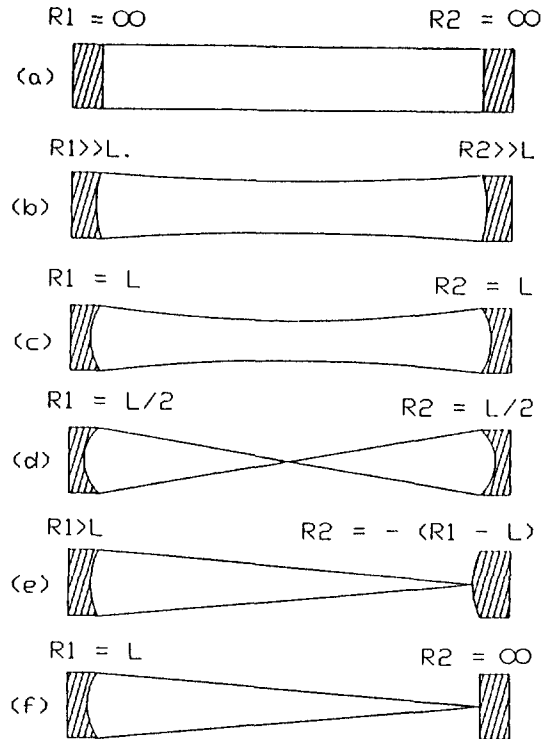


Fig. 2. Some common resonator configurations (R1 and R2: mirror radii, L: cavity length); (a) plane parallel, (b) large radius, (c) confocal, (d) spherical, (e) concave-convex, and (f) hemispherical mirrors.

너지는 반파장판(half-wave plate, WP1)을 이용하여 조절한 후 광분할기(beam splitter)를 통하여 재생식 증폭기에 주입하였으며 소멸율 1000:1 이상의 패러데이 회전자(Faraday rotator, FR)와 광분할기(BS2)를 함께 사용함으로써 발진기와 증폭기를 광학적으로 충분히 분리하여 안정된 작동을 하게 하였으며 레이저 공진기를 증폭기 feedback으로 부터 보호하였다. 레이저의 이득 물질(gain medium)로는 직경 4 mm, 길이 104 mm의 Nd:YLF 봉을 사용하였으며 한 쌍의 Brewster 각 편광판(P1, P2)은 연속파 발진을 1.053 μm 에 국한시켰다.

전기광학적 스위치는 $\lambda/4$ -판(WP2)과 Pockels cell(PC)로 구성되어 있으며 레이저빔이 p -편광되어 있을 때 편광판을 통과할 수 있다. 즉, 증폭기 공진기(amplifier resonator)는 s -파에 대해서만 진동한다. 따라서 펄스가 증폭기에 트랩되기 위해서는 입사 편광이 p -파에서 s -파로 회전되어야 한다. 최초로 Pockel cell에 전압이 가

해지지 않았을 때는 $\lambda/4$ -판 증폭기 공진기에서 $\pi/4$ 지연이 되도록 놓여져 종자펄스를 주입한다. 이 종자펄스는 공진기에서 $\lambda/4$ -판을 4번 통과하며 총 위상 변화는 π 가 된다. 마찬가지로 $\lambda/4$ 전압이 Pockels cell에 가해지면 종자펄스는 $\lambda/4$ -판과 Pockels cell을 두 번 통과한 후 빠져나가지만, Pockels cell이 0에서 $\lambda/4$ 지연을 일으키는 동안 증폭기 내에 있던 펄스는 추가로 $\pi/4$ 위상 변화가 생기므로 증폭기 내에 주입된 채로 남아 있게 된다. 또한 같은 전압($\lambda/4$)가 증폭기 공진기를 Q-변환하게 되며, 주입된 펄스는 $\lambda/2$ 전압, 즉 $\pi/2$ 지연이 일어날 때까지 YLF 붐을 통하여 계속하여 증폭된 후, $\pi/2$ 지연에서는 펄스는 c-파로 회전되어 편광판을 통해서 cavity dumping된다. 종자펄스를 올바르게 주입하기 위해서는 Pockels cell 결정을 스윕칭하는데 사용된 고전압 펄스와 관련된 일정한 상승 시간이 두개의 연속된 결감진 종자펄스 사이의 간격보다 짧아야 한다. 만일 이 시간보다 길면 두번째 펄스는 Pockels cell의 $\lambda/4$, 즉 전압이 0이 아닐 때 Pockels cell에 도달하여 contrast ratio가 나빠진다. 이와같이, 펄스의 선택, Q-변환 및 cavity dumping은 Pockels cell에 의해서 조절된다. 따라서 Pockels cell을 이루는 전기광학적 물질의 선택이 출력 빔의 특성과 최대 반복률에 큰 영향을 미침을 알 수 있다. Pockels cell로 사용하기에 적합한 물질을 선택하기 위하여 KDP와 Li-NbO₃(lithium niobate)에 대해서 contrast ratio, 흡수율, 반복률 등을 고려하였다. KDP는 contrast ratio가 LiNbO₃보다 크고 음향 잡음(acoustic noise)에 대해 무감각하지만 흡수율은 LiNbO₃가 0.5%임에 비해 약 2.5%로 크게 나타난다. 반복률 400 Hz 이상에서는 공간 모드가 불안정하게 되고 모드 특성이 일화된다. 또한, 공진기를 단일 통과할 때 얻어지는 이득이 크므로 종자펄스가 공진기를 통과하는 횟수가 적으며 열렌즈 효과가 커서 Pockels cell로 사용하기에 부적합하다. 여기에 대해 LiNbO₃는 acoustic ringing이 발생되므로 최고 반복률이 제한되지만 흡수율 등 기타 성질이 우수하므로 재생식 증폭기에 적합하다.

IV. 재생식 증폭기의 동작 및 출력 특성

그림 3은 cavity dumping 없이 재생식 증폭기의 작동중에 반사율 99%인 오복거울(M1)을 통하여 새어 나오는 빛을 광 다이오드(photodiode)로 검출한 것이다. 각각의 Peak는 한개의 트래픽된 펄스가 공진기를 왕복하는 시간 동안에 거울에 돌아오면서 진폭이 변화된 것으로써

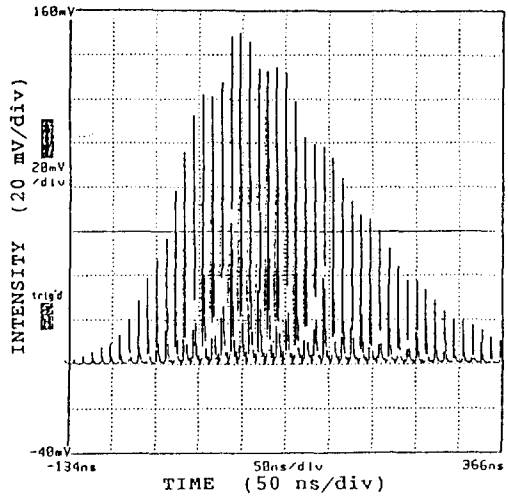


Fig. 3. Nd:YLF mode-locked pulse train.

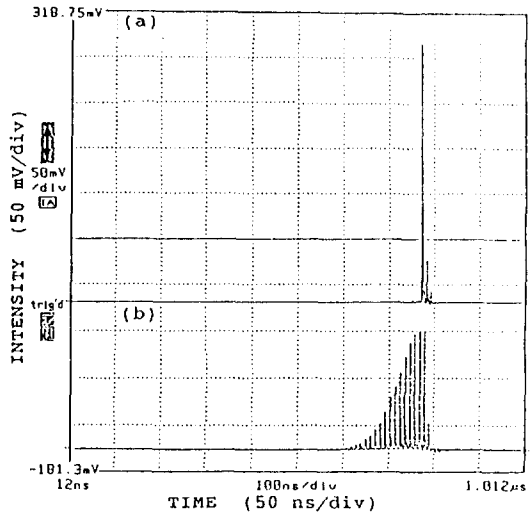
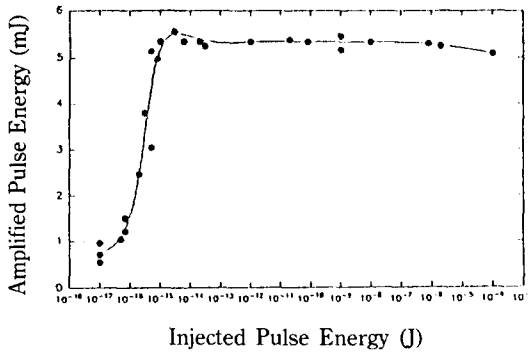


Fig. 4. Injection seeded and cavity dumping of a regenerative amplifier; (a) switchout pulse of cavity dumping, and (b) mirror leakage of injection seeded.

peak 사이의 간격은 증폭기 내에서 펄스의 왕복운동에 걸리는 시간인 10.5 ns이었으며 시간 경과에 따른 이들 곡선은 종자펄스가 없을 때의 Q-변환 곡선과 동일하였다. 그림 4(a)는 공진기 내의 종자펄스가 최대 광밀도에 도달하였을때 cavity dumping을 통하여 단일 펄스가 발생하는 것을 나타냈다. 즉, 그림 4(b)와 같이 종자펄스가



Injected Pulse Energy (J)

Fig. 5. The output of a regenerative amplifier as a function of injected pulse energy.

공진기내를 여러번 왕복하여 이득이 최대 광밀도에 도달하였을 때 Pockels cell에 $\lambda/2$ 전압을 가하면 cavity dumping이 일어나 그림 4(a)와 같이 공진기내의 모든 에너지가 제거되고 증폭된 단일 펄스가 출력됨을 알 수 있다. 그림 5는 종자펄스의 입사 에너지와 재생식 증폭기의 출력 에너지의 관계를 나타낸 것으로서 입사 펄스의 에너지가 증가함에 따라 출력 펄스의 에너지도 증가하다가 입사 펄스의 에너지 10^{-14} mJ 이상에서는 출력 에너지가 일정함을 나타내었다. 레이저의 평균 출력은 반복률 700 Hz까지는 반복률에 비례하여 증가하였으나 반복률 700 Hz 이상에서는 일정한 출력을 나타내었다. 이는 낮은 반복률에서는 레이저 발진 회수에 따라 레이저 출력이 비례적으로 증가하지만 높은 반복률에서는 레이저의 출력 증가가 억제되기 때문이다. 또한, 펄스당 에너지는 반복률 700 Hz까지는 최대 에너지 5 mJ로 일정하였으며 반복률 700 Hz 이상에서는 반복률의 증가에 따라 펄스당 에너지가 감소되어 반복률 1 kHz에서의 펄스당 에너지는 3 mJ이 되었다. 최대 에너지는 더 이상 증가될 수도 있으나 LiNbO_3 결정의 손상문턱(damage threshold)에 의해서 5 mJ로 제한되었다. 재생식 증폭기를 통과한 후의 레이저 펄스의 출력은 10^{13} Wcm^{-2} 이상, 안정도는 2-3%이었으며, 1 mJ보다 낮은 에너지에서는 3.5 kHz 이상의 높은 반복률이 얻어졌다.

재생식 증폭기의 작동중 모드 특성 및 빔 직경은 플래시 램프의 펌프 출력 및 반복률의 함수로 측정하였다. 레이저 빔의 직경은 공진기의 볼록거울면에서 0.9 mm로 가장 작으며 오목거울면에서 3.3 mm로 가장 크다. 모드 특성은 IR-sensitive CCD 카메라로 모니터링한 결과 그림 6과 같이 TEM₀₀ 모드를 나타내었다. 반복률 0.2-2 kHz 사이에서는 반복률이 변화되거나 램프의 펌프 에너지가

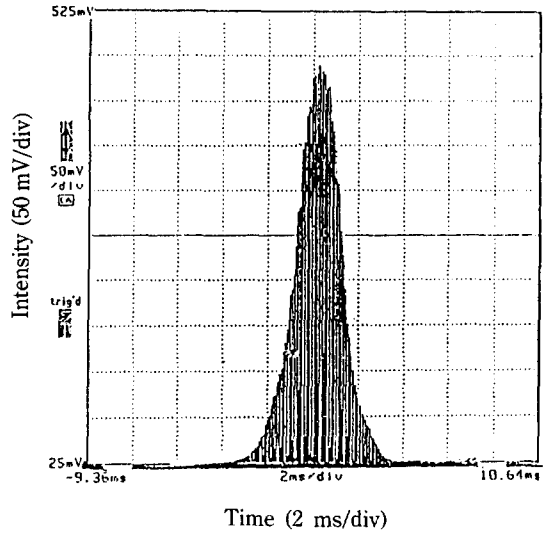


Fig. 6. Regenerative amplifier's output beam profile at far field.

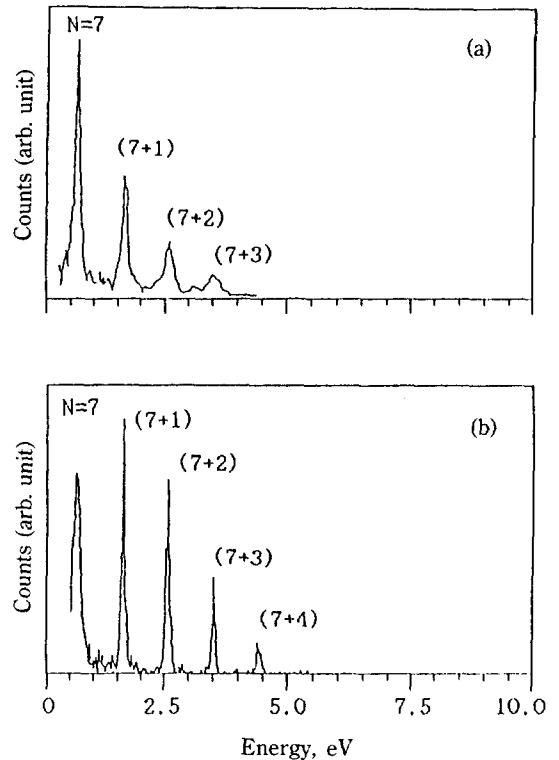


Fig. 7. Electron energy spectrum of magnesium for (a) 1064 nm, commercial Nd:YAG laser, and (b) 1053 nm, Nd:YLF regenerative amplifier.

변화되어도 출력 빔의 모드 분포에는 영향이 없었다. 이와같이 Nd:YLF 재생식 증폭기는 넓은 범위의 펄스 출력과 고반복률에서 안정된 작동을 하였다.

그림 7은 마그네슘 원자가 고강도 레이저 펄스와 반응하여 다광자 이온화(multiphoton ionization)에 의해 above-threshold ionization 현상을 나타내는 스펙트럼으로써 고진공 챔버 속에서 원자 빔과 레이저 빔을 서로 수직으로 교차시켜 발생하는 전자를 time-of-flight 스펙트럼미터로 측정 한 것이다.^[13] 그림 7(a)는 펄스 폭 10 ns, 파장 1064 nm인 재생식 Nd:YAG를 사용하여 구한 것이고,^[14] 그림 7(b)는 본 연구를 통해서 제작한 Nd:YLF 재생식 증폭기를 사용한 것이다. 재생식 레이저의 경우 분해능이 약 60 meV임에 대하여 재생식 증폭기의 경우는 약 40 meV로 분해능이 훨씬 우수하고 background 잡음이 감소함을 알 수 있다. 이는 Nd:YLF 재생식 증폭기가 고 반복률로 작동하므로 통계학적인 오차가 감소함과 아울러 종자펄스가 공진기 내에 머무는 시간이 길어 레이저 펄스의 안정성이 크기 때문이라 생각된다.

V. 결 론

고출력, 고반복률의 레이저 펄스를 발생시키기 위하여 공진기 내에서 종자펄스를 여러번 왕복시키며 증폭하는 재생식 증폭기를 설계, 제작하고 그 특성을 구하였다. 고출력, 고반복률에서의 레이저 매질로는 열렌즈 효과와 자연적인 복굴절성이 적으며 열전도도가 큰 Nd:YLF가 효율적임을 나타내었다. 레이저 공진기는 광학부품이 공진기 내에서 손상을 입지 않도록 오목거울과 볼록거울로 구성하였다. 출력 펄스의 구조는 가우시안 모드를 나타내었으며 종자펄스의 에너지 100 pJ에 대하여 최대 반복률 3.5 kHz, 최대 출력 5 mJ을 나타내었다. 제작된

재생식 증폭기는 빔 특성이 우수한 고출력, 고반복률 레이저이므로 고강도 레이저 장에서의 여러가지 반응을 연구하는데 유용하게 사용될 전망이다.

참 고 문 헌

- [1] W. H. Lowdermilk and J. E. Murray, J. Appl. Phys. **51**, 2436 (1980).
- [2] W. H. Lowdermilk and J. E. Murray, J. Appl. Phys. **51**, 3548 (1980).
- [3] V. J. Newell, F. W. Deeg, S. R. Greenfield and M. D. Fayer, J. Opt. Soc. Am. **B6**, 257 (1989).
- [4] I. N. Duling III, T. Norris, T. Sizer II, P. Bado and G. Mourou, J. Opt. Soc. Am. **B2**, 616 (1985).
- [5] J. M. Dawes and M. G. Sceats, Opt. Commun. **65**, 275 (1988).
- [6] D. Strickland and G. Mourou, Opt. Commun. **56**, 219 (1985).
- [7] J. C. Postlewaite, J. B. Meirs, C. C. Reiner and D. D. Dlott, IEEE J. Quantum Electron. **24**, 411 (1988).
- [8] P. Bado, M. Bouvier and J. S. Coe, Opt. Lett. **12**, 319 (1987).
- [9] J. E. Murray, IEEE J. Quant. Elect. **QE-19**, 488 (1983).
- [10] A. L. Harmer, A. Linz and D. R. Gabbe, J. Phys. Chem. Solids **30**, 1483 (1969).
- [11] H. Vanhessele, Opt. Lett., **13**, 369 (1988).
- [12] A. E. Siegman, Lasers (University Press, Edinburgh, 1986).
- [13] L. F. DiMauro, Dalwoo Kim, M.W. Courtney and M. Anselment, Phys. Rev. **A38**, 2338 (1988).
- [14] Dalwoo Kim, J. Kor. Phys. Soc. **23**, 191 (1990).

Regenerative Amplification of Pulses in Nd:YLF

Dalwoo Kim

Department of Physics, Research Institute of Industrial Science and Technology, Pohang 790-330

M. Saeed and L. F. DiMauro

Brookhaven National Laboratory, Upton, N.Y. 11973, U.S.A.

(Received: October 9, 1991)

Nd:YLF regenerative amplifiers have proved to be reliable source for producing stable short pulses of high repetition rate. We used a convex-concave mirror design to optimize output energy and stability while minimizing the energy density on critical intracavity optical components. The Nd:YLF laser pulse is used as a seed pulse which has pulse width of 40 ps, energy of 100 pJ, and wavelength of 1053 nm. The amplifier yields stable 1 mJ pulses at 3.5 kHz repetition rate, and the maximum energy is measured as 5 mJ.