

Cavity-dumping형 Nd:glass laser의 제작 및 특성 조사*

차용호 · 강응철 · 남창희

한국과학기술원 물리학과

(1995년 3월 9일 받음)

이득 선포이 넓고, 가공이 쉬워 고출력 레이저의 증폭 이득 매질로 유리한 Nd:glass 이득 매질의 소신호 이득 계수를 측정하고, 이 Nd:glass를 이용하여 제작한 cavity-dumping형 레이저의 출력 특성을 조사하였다. 소신호 이득 계수를 측정하기 위해 Nd:glass, Pockels cell, 편광분할기 등을 포함하는 공진기를 구성하였으며, 측정된 소신호 이득 계수는 전기 입력 에너지가 100 J일 때 0.088 cm^{-1} 이었고, 구성된 공진기의 왕복 내부 손실은 56%였다. Cavity-dumping형 레이저 공진기는 곡률반경이 2 m인 두개의 전 반사경과 Nd:glass, Pockels cell, 편광분할기, $\lambda/4$ plate 등으로 구성되었으며, 제작된 레이저의 출력 에너지는 전기 입력 에너지가 140 J일 때, 최대 0.85 J이었고, 출력 레이저 펄스폭은 8 ns였다.

I. 서 론

고온 고밀도 플라즈마 연구, X-선 레이저 개발, 레이저 빔에 의한 표적 손상 효과 연구 등에 사용되는 극초단 고출력 레이저는 극초단 펄스를 생성하는 첨두 공진기와 레이저 펄스의 에너지를 충분히 증폭시키는 증폭단으로 구성된다.^[1-5] 첨두 공진기에서 나오는 레이저 펄스는 펄스폭이 매우 짧고, 수 nJ 정도의 매우 적은 에너지를 가지므로 표적 손상 효과 연구 등에 응용하려면 증폭단에서 적어도 백만배 이상의 증폭을 해야 한다. 보통의 증폭기만을 사용하여 이렇게 높은 증폭율을 얻으려면 4~6개 정도의 증폭기가 필요하게 되므로, 증폭단의 부피가 커지고 복잡하게 된다. 그러나, 보통의 공진기와 유사한 구조를 가지고, 첨두 공진기에서 나온 펄스를 공진기내에 가두어 충분히 증폭시킨 다음, 공진기 외부로 출력하는 재생증폭기를 사용하면 1개의 증폭기로 백만배 이상의 증폭이 가능하다.^[6-8]

재생 증폭기를 비롯한 증폭단의 이득 매질은, 이득 선포이 증폭하려는 펄스의 파장 선포이보다 충분히 넓어야 하며, 이득 중심 파장이 펄스의 중심 파장과 일치해야 한다. Nd:glass는 이득 선포이 20 nm 정도로 넓어 에너지 저장면에서 유리하고, 유리의 특성상 제작이 쉬워 비교적 쉽게 큰 부피의 이득 매질을 만들 수 있는 장점 때문에

극초단 고출력 레이저의 증폭 이득 매질로 주목 받아 왔다. 이러한 Nd:glass의 이득 중심 파장은 1054 nm이므로 Nd:glass를 증폭단의 이득 매질로 사용할 경우, 첨두 공진기의 이득 매질로는 중심 파장이 1053 nm인 Nd:YLF가 많이 사용된다.^[9]

본 논문에서는 Nd:glass를 이득 매질로 하는 재생증폭기를 제작하여 극초단 Nd:YLF 레이저 펄스를 증폭하기 위한 준비 단계로서, Nd:glass의 소신호 이득 계수를 측정하였고, 제작하고자 하는 재생증폭기와 똑같은 구조를 갖는 cavity-dumping형 레이저 공진기를 구성하여, 레이저의 출력 에너지, 펄스폭 등을 측정하였다. 레이저의 공간적인 에너지 분포를 균일하게 하기 위해 공진기내에 바늘구멍을 설치하였고, 이때의 출력 에너지도 측정하였다.

II. Nd:glass의 소신호 이득 계수 측정

소신호 이득 계수는 첨두 공진기에서 나오는 극초단 펄스와 같이 매우 작은 에너지의 레이저 펄스가 이득 매질을 통과할 때 매질이 갖는 이득 계수로서, 매질의 소신호 이득 계수를 측정하는 것은 재생증폭기를 구성하기 위한 기본이 되며 이로부터 재생증폭기의 증폭율을 추정할 수 있다.

소신호 이득 계수를 측정하기 위해서는 측정하고자 하는 이득 매질을 포함하는 공진기를 구성해야 하며, 이때 구성된 공진기의 내부 손실도 함께 측정할 수 있다.

*본 연구는 국방부 위탁 전자광학 특화연구센터의 일부 지원에 의한 것임.

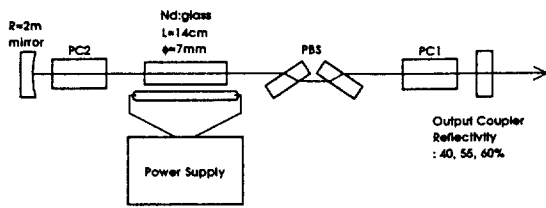


그림 1. Experimental setup for small signal gain measurement.

그림 1은 Nd:glass 이득 매질의 소신호 이득 계수를 측정하기 위해 구성한 공진기를 나타낸다. 공진기는 그림과 같이 Nd:glass 봉, Pockels cell, 편광분할기(polarizing beam splitter), 후면 반사경, 출력경으로 이루어진다. 섬광등에 의해 펌핑되는 Nd:glass 봉은 길이 14cm, 지름 7mm의 원통형이고, 봉의 양쪽 1cm는 봉을 고정하는 데 사용되어, 섬광등에 의해 펌핑되지 않는다. 공진기의 길이는 1.25 m이며, 후면 반사경의 곡률반경은 2m, 출력경은 평면경을 사용하여 공진기의 안정조건을 만족하도록 하였다. Pockels cell, 편광분할기는 재생증폭기를 구성하는 데 필요한 광학 부품으로서, 공진기내에서 손실요인이 될 수 있다. Nd:glass의 소신호 이득 계수만을 측정하려면 공진기 내에 Nd:glass 봉만 있으면 충분하지만, 재생증폭기를 구성할 때에는 다른 구성요소들에 의한 손실을 아는 것도 매우 중요하므로 Pockels cell, 편광분할기 등도 설치 하였다.

Nd:glass를 펌핑하는 섬광등은 전원장치에 의해 에너지를 공급받으며, 전원장치에는 200 μF 의 축전기가 내장되어 있어서, 이 축전기가 특정 전압까지 충전된 후, 축전기에 저장된 에너지가 섬광등을 통해 방전된다. 따라서, 전원장치가 섬광등에 공급해 주는 전기 입력 에너지는 축전기에 저장되는 에너지로부터 구할 수 있다. 즉, 1000 V로 충전시킬 경우, 전기 입력 에너지는 100 J이 된다.

이상의 실험장치와 다음의 식을 사용하면 Nd:glass의 소신호 이득 계수와 공진기 내부 손실을 측정할 수 있다.^[10]

$$g_0 l = KE_{in} \quad (1)$$

$$-\ln R = 2KE_{in} - L \quad (2)$$

여기서 g_0 은 소신호 이득 계수, l 은 이득 매질의 길이, E_{in} 은 섬광 등에 공급되는 전기 입력 에너지, R 은 출력경의 반사율, E_{in} 은 문턱 전기 입력 에너지이며, L 은 공진기 내부의 손실 계수, K 는 비례 상수이다. 식에서 알 수 있듯이, Nd:glass를 이득 매질로 하여 구성한 위의 공

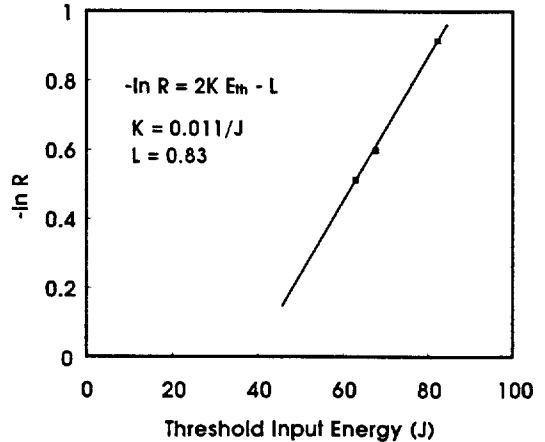


그림 2. Threshold input energy as a function of mirror reflectivity.

진기에서 출력경의 반사율을 다르게 하고, 그에 따른 문턱 전기 입력 에너지를 구하면 소신호 이득 계수를 측정할 수 있다. 이렇게 측정된 소신호 이득 계수는 섬광등이 방전하는 전체 시간 동안 매질이 갖는 평균적인 이득 계수를 의미한다.

출력경은 반사율이 40%, 55%, 60%인 것을 사용하였으며, 각 출력경에 대해 문턱 전기 입력 에너지를 측정하여 그림 2와 같은 결과를 얻었다. 식 2에서 예측할 수 있듯이 출력경 반사율의 로그값과 문턱 전기 입력 에너지는 선형적인 관계를 나타내었으며, 그 기울기 K 는 0.011 J^{-1} , 손실 계수 L 은 0.83이었다. 이 K 값과 Nd:glass 봉의 길이를 알면 식 (1)로부터 소신호 이득 계수를 계산할 수 있으며, 전기 입력 에너지가 100 J일 때 계산된 소신호 이득 계수는 0.088 cm^{-1} 이다. 손실 계수로부터 $\exp(-L)$ 를 계산하면 공진기 내부의 왕복 손실을 구할 수 있으며, 계산된 공진기 왕복 손실은 56%였다. 공진기내의 손실이 상당히 크게 나왔으며, 두개의 편광분할기 정렬을 정확하게 하지 못했던 것이 주 원인으로 생각된다. 이상의 결과로부터 전기 입력 에너지가 100 J일 때, 공진기의 왕복 이득, $\exp(2g_0 l - L)$ 은 3.6임을 알 수 있다.

III. Cavity-dumping형 Nd:glass 레이저의 특성

Cavity-dumping형 레이저는 공진기의 후면 반사경과 출력경의 반사율을 모두 100%로 하여, 출력 손실 없이 높은 에너지 밀도로 레이저가 발진되도록 한 후, 한번의

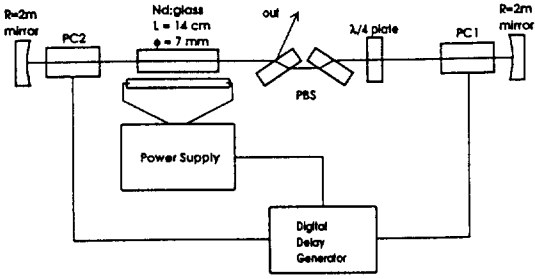


그림 3. Experimental setup of a cavity-dumped Nd:glass laser.

왕복시간 동안 공진기내의 에너지를 한꺼번에 외부로 방출시키는 레이저이다. 그림 3은 앞에서 언급한 Nd:glass를 이득 매질로 하여 구성한 cavity-dumping형 레이저의 구성도이다. 공진기에 사용된 거울은 곡률반경이 2 m이고, 1054 nm에 대해 전반사 코팅되어 있으며, 공진기 안에서 발진된 레이저를 외부로 방출시키기 위해 Pockels cell과 편광분할기를 사용한다. 즉, 편광분할기에 의해 공진기 안에 P 편광의 레이저가 발진되도록 한후, PC2 (Pockels cell 2)를 공진기 왕복시간보다 충분히 짧은 시간동안 $\lambda/4$ plate로 만들면 그 뒤에 PC2를 통과하는 레이저는 S 편광이 된 후 편광분할기에 반사되어 공진기 밖으로 출력된다.

$\lambda/4$ plate와 PC1 (Pockels cell 1)은 일종의 Q-switching을 하기위한 것이다. PC1이 $\lambda/4$ plate가 되기 전에는 편광분할기를 통과한 P 편광의 레이저가 $\lambda/4$ plate를 통과한 후 원편광이 되고 거울에 반사되어 다시 $\lambda/4$ plate를 통과하면 S 편광이 되므로 편광분할기에 반사되어 손실된다. 따라서 이 때에는 레이저 발진이 안되고, 밀도 반전은 증가한다. PC1이 $\lambda/4$ plate가 되는 순간부터는 두개의 $\lambda/4$ plate가 서로 상쇄되어 증가한 밀도 반전에 의해 레이저 발진이 시작된다. 강한 Q-switching이 일어나기 위해서는 PC1이 Nd:glass의 밀도 반전이 최대가 되었을 때 작동되어야 하며, 섬광등이 방전을 시작한 후 약 350 μ s 후에 밀도 반전이 최대가 되는 것으로 추정되었다.

Pockels cell은 가로, 세로 1 cm, 길이 3.5 cm의 KD*P 결정으로 이루어져 있고, $\lambda/4$ plate로 동작하기 위해서는 4.2 kV의 전압을 걸어주어야 한다. 4.2 kV의 전압은 외부의 trigger 신호에 맞추어 작동하는 Pockels cell 구동장치가 걸어주며, 이때 상승시간은 2 ns 미만이고 약 500 ns 정도 전압이 유지된 후 서서히 감소한다.

Cavity-dumping형 레이저가 제대로 작동하기 위해서

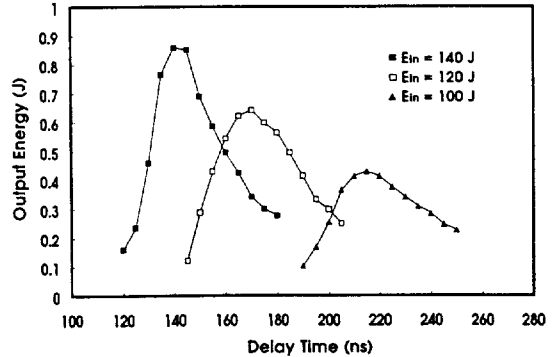


그림 4. Output energy of a cavity-dumped Nd:glass laser with respect to time delay at different input energy.

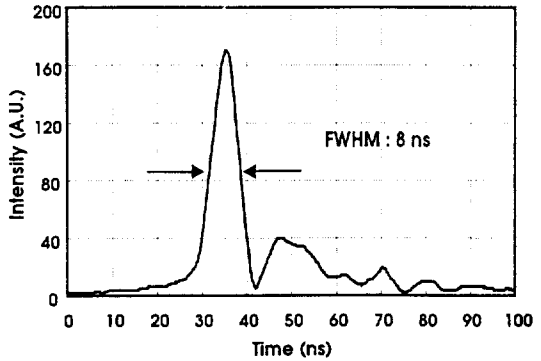


그림 5. Output signal of cavity-dumped laser detected by Ge-photodetector.

는 섬광등, PC1, PC2가 순차적으로 적절한 시간 간격을 두고 정확하게 동작해야 한다. 이를 위해 수 picosecond 이내의 오차로 정확하게 trigger 신호를 보낼 수 있는 시간 지연 펄스 생성기(digital delay generator)를 사용하였다. 이 시간 지연 펄스 생성기를 사용하여, 섬광등이 방전을 시작한 다음 350 μ s 후에 PC1을 작동시켰으며, 다시 수 백 ns의 지연 시간을 두고 PC2를 작동시켜 레이저 출력을 얻었다. 그림 4는 PC1과 PC2 사이의 지연 시간을 조절하면서 출력된 레이저 펄스의 에너지를 측정 한 것이다. 특정한 전기 입력 에너지에 대해서, 지연 시간이 길어짐에 따라 출력 에너지가 증가하다가 다시 감소하는 모습을 볼 수 있다. 처음에 출력 에너지가 증가하는 것은 공진기 손실에 비해 이득 매질에 의한 이득이 커서 공진기내에 에너지가 증가한다는 것을 의미하며, 출력 에너지가 감소하는 것은 그 반대의 경우를

의미한다. 만일 공진기의 손실이 작다면 한번 공진기내에 형성된 레이저 에너지가 계속 유지되므로 출력 에너지가 감소하는 정도가 작을 것이나, 본연구에서 제작한 공진기는 앞절에서 구한 바와 같이 손실이 큰 편이므로 레이저 출력이 비교적 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 입력 에너지를 크게하면 전체적인 레이저 출력도 증가하였으며 최대의 레이저 출력이 나오는 PC1과 PC2 간의 지연시간도 짧아지는 경향을 나타내었다.

그림 5는 상승시간이 3 ns 미만인 Ge-photodetector와 250 MHz의 오실로스코프를 이용하여 레이저 출력 펄스의 시간폭을 측정한 것이며, 약 8 ns 정도의 펄스폭을 가짐을 알 수 있다. Cavity-dumping형 레이저의 특성상 출력 펄스폭은 레이저가 공진기를 한번 왕복하는 시간과 같게 되며, 제작된 공진기의 길이는 1.25 m이므로 측정 결과와 대략 일치한다. 그림 4에서 입력 에너지가 140 J일 때, 최대 0.85 J의 에너지가 출력되었으며, 에너지 효율은 약 0.6%, 펄스 출력은 100 MW 정도였다.

재생증폭기로 펄스를 증폭할 때에는 펄스의 에너지를 크게하는 것도 중요하지만 펄스의 공간적인 에너지 분포를 균일하게 하는 것도 매우 중요하다. 공간적인 에너지 분포가 불균일하면 다음 증폭기의 광학부품이 손상될 우려가 있고, 레이저 펄스를 집속할 때에도 불리하기 때문이다. 따라서, 레이저 발진 모드를 TEM₀₀ 모드로하여 출력되는 레이저 펄스가 Gaussian 형태가 되도록 하는 것이 유리하다. 그림 3의 공진기 내에 반경 0.5 mm의 바늘구멍을 추가하여 TEM₀₀ 모드만 발진되도록 하였으며, 이경우 전기 입력 에너지가 169 J일 때 최대 35 mJ의 펄스 에너지가 출력 되었다.

IV. 결 론

이득 선포이 넓고, 제작이 쉬워, 고출력 레이저의 증폭 이득 매질로 유리한 Nd:glass의 소신호 이득 계수를 측정하고, 이 Nd:glass를 이득 매질로하여 제작한 cavity-dumping형 레이저의 출력 특성을 조사하였다. Nd:glass의 소신호 이득 계수는 Nd:glass 봉, Pockels cell, 편광분할기 등을 포함하는 공진기를 구성하여 측정되었으며, 측정된

소신호 이득 계수는 전기 입력 에너지가 100 J일 때, 0.088 /cm였고, 구성된 공진기 내부의 왕복 손실은 56%였다. Cavity-dumping형 레이저는 출력경의 반사율을 100%로 하여 출력경에 의한 손실이 없도록 제작되었으며, 공진기 내에 발진된 레이저는 Pockels cell과 편광분할기에 의해 공진기 밖으로 출력되었다. 출력된 레이저 펄스의 에너지는 전기 입력 에너지가 140 J일 때, 최대 0.85 J이었으며, 출력된 레이저의 펄스폭은 공진기의 왕복주기와 일치하는 약 8 ns 정도였다. 출력되는 레이저 펄스의 공간적인 에너지 분포를 균일하게 하기 위해 공진기내에 바늘구멍을 설치하여 TEM₀₀ 모드만 발진되도록 하였으며, 이경우 출력된 레이저 펄스의 에너지는 전기 입력 에너지가 169 J일 때 최대 35 mJ이었다. 이상의 실험결과는 Nd:glass를 이득 매질로 하는 재생증폭기 제작과 이를 이용한 극초단 Nd:YLF 레이저 펄스 증폭 실험에 응용될 것이다.

참 고 문 헌

- [1] F. G. Patterson, R. Gonzales and M. D. Perry, Opt. Lett. **16**, 1107(1991).
- [2] F. Billhardt, M. Kalashikov, P. V. Nickels and I. Will, Opt. Comm. **98**, 99(1993).
- [3] C. H. Skinner, Phys. Fluids B **3**, 2420(1991).
- [4] S. Suckewer and C. H. Skinner, Science **247**, 1553(1990).
- [5] E. M. Campbell, Phys. Fluids B **4**, 3781(1992).
- [6] J. E. Murray and W. H. Lowdermilk, J. Appl. Phys. **51**(7), 3548(1980).
- [7] J. Weston, R. N. Ettlbrick and R. Aubert, J. Opt. Soc. Am. **13**, 990(1988).
- [8] D. Strickland and G. Mourou, Opt. Comm. **56**, 219(1985).
- [9] J. Goodberlet, J. Wang, J. G. Fugimoto, and P. A. Schulz, Opt. Lett. **14**, 1125(1989).
- [10] W. Koechner, *Solid-state Laser Engineering*, Third edition, (Springer-Verlag, New York, 1976) pp. 96-103.

Investigation on the Characteristics of a Cavity-dumped Nd:glass Laser

Yong-Ho Cha, Eung Cheol Kang and Chang Hee Nam

Dept. of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejon 305-701, Korea

(Received: March 9, 1995)

A small signal gain coefficient of Nd:glass was measured and a cavity-dumped laser was constructed. To measure the small signal gain coefficient, we constructed a resonator consisting of Nd:glass, Pockels cell, polarizing beam splitter. The measured small signal gain coefficient was 0.088 cm^{-1} when the input energy was 100 J and the round-trip internal loss of the resonator was 56%. The cavity-dumped laser was constructed using Nd:glass, 2 m radius of curvature HR-mirrors, Pockels cell, polarizing beam splitter and $\lambda/4$ plate. The output energy of cavity-dumped laser was 0.85 J at 140 J input energy and the laser pulse width was 8 ns.