

## 펄스형 Nd:YAG 레이저의 출력특성과 이득계수 측정

박대운 · 김현태 · 최철재  
인하대학교 물리학과

이상호 · 김한태  
쌍용중앙연구소 신소재연구소

(1998년 11월 12일 받음, 1998년 12월 24일 수정본 받음)

국내에서 성장 가공시킨 Nd:YAG 결정을 사용한 발진기를 설계제작 하였다. 이로부터 발진동작, Q-스위칭, 출력광속의 위상파면 등을 조사하였으며, 다음으로 단일 경로 이득을 측정하였다. 출력경의 반사율의 변화에 따르는 문턱 입력에너지 를 결정하고 이로부터 단일 경로 이득을 계산하였다. 한편 레이저 발진기와 레이저 증폭기를 사용하는 보편적인 방법에 의 하여 단일 경로 이득을 측정하여 비교 검증하였다. Q-스위칭 레이저 최대출력은 1.5 MW이고, 펄스폭은 30ns이었으며, 문턱 에너지에서 이득은  $0.0958 \text{ cm}^{-1}$  이었다. 실험과정에서 똑같은 사양의 외국산 Nd:YAG 결정에 의한 비교실험을 동시에 수행하였으며, 이로부터 국산 레이저 Nd:YAG 결정의 레이저 발진 특성이 우수함을 확신할 수 있었다.

### I. 서 론

Nd:YAG 결정은 1964년 J.E. Gensic이 레이저를 발진시킨 후 다른 레이저 결정보다 높은 열전도율로 인한 효율적인 냉각이 가능하다는 점과 기계적 강도가 높다는 장점이 있어 레이저 이득매질로서의 사용이 급격하게 증가하여 왔다.<sup>[1]</sup> 국내에서는 레이저용 단결정 연구가 화학연구소, 자원연구소, 서울대 등 일부 정부출연연구소와 대학을 중심으로 연구가 이루어져 왔다. 그러나 이들 연구는 상업화와는 거리가 있는 실험실적 규모의 연구였으며, 1996년 (주)쌍용양회 중앙연구소의 신소재 개발팀에서 상업화를 위한 대량 생산 방법인 Czochralski 성장법에 의하여 Nd:YAG 레이저 결정의 국산화에 성공하였으며,<sup>[2]</sup> 본 실험에서는 이 결정을 사용하여 레이저 펄스 출력특성 실험연구를 수행하였다.

이 국산 Nd:YAG 레이저 결정은  $\text{Nd}^{3+}$  이온 농도가 1.0 at%인 것으로 크기는  $4 \text{ mm}\Phi \times 63.1 \text{ mmL}$ 인 것을 사용하였다. Q-스위칭 발진동작은 Pockels Cell을 사용하였으며, 위상파면 측정은 Mach-Zehnder 간섭법과 Fourier 변환법에 의하여 정밀하게 조사되었다. 미국 Union Carbide 사 제품인 같은 농도, 같은 치수의 Nd:YAG 레이저 결정을 구입 사용하여 비교 실험하였으며, 이로부터 본 실험의 측정값의 정당성을 입증하였다. 레이저 발진을 위한 PFN(Pulse Forming Network), 레이저 조정기, Q-스위칭 동작용 전기회로 등의 레이저 전원 및 조정회로를 모두 실험실에서 제작하여 사용하였다.

본 연구는 (주)쌍용중앙연구소의 고체 레이저용 산화물 단결정 소재 개발 연구 과제와 1997년도 교내 연구비 지원에 의하여 수행된 것임

### II. 레이저 장치와 실험 결과

#### 2.1. 발진기 및 전원공급장치

공진기의 구성은 그림 1과 같이 안정형 공진기로 설계하였으며, 곡률반경이 2.5 m인 전반사경과 반사율이 42% 또는 70%인 평면 출력경으로 된 반초점형(Hemiconfocal) 공진기이며, 길이는 59 cm이다. Q-스위칭은  $\text{LiNbO}_3$  결정으로 된 Pockels Cell을 설치 하였다. 사용한 레이저 결정은 직경 4 mm, 길이 63 mm의 크기를 가지며, 양단면에 무반사 다층박막을 증착하였다. 레이저 헤드는 확산반사면( $\text{BaSO}_4$ 분말)을 가진 수냉식 원통형 공동을 사용하여 레이저 결정과 섬광관을 고정하였다. 섬광관은 76 mm의 아크 길이를 갖는 ILC사의 5L3을 사용하여 광펄핑을 하였다. 제작 사용한 레이저 장치에서는 반복률의 향상과 섬광관의 긴 수명을 유지하는데 적합한 simmer 트리거 방식을 채택하였다.<sup>[3]</sup> 레이저를 구동시키기 위한 전력 공급계통은 크게 전력공급기와 레이저 제어기로 설계 구성하였고, 축전기의 전력 공급기(a.l.e. Co. Model 302L)는 4 kW용량인 것을 사용하였다. 레이저 제어기는 simmer 전원 공급기, 고전압 simmer 트리거 펄스 발생기, PFN, Pockels cell 구동 회로, 디지털 시간지연 회로로 구성되었으며, 모두가 실험실에서 제작하였다.

#### 2.2. 발진 실험 및 결과

구성된 반초점형 공진기에서 반사율 R이 42%와 70%인 출력경을 사용하여 반사율에 따른 정상발진 출력을 조사하였다. 출력에너지는 에너지 측정기(Ophir, PE-25)와 고속 PIN 광 다이오드(Hamamatsu S1722, 상승시간 1ns 이하)를 사용하여 검출하였다. 42% 반사율의 출력경을 사용하였을 때, 다중 모드 출력은 최대 전기입력에너지 90 J에 대하여 500 mJ의

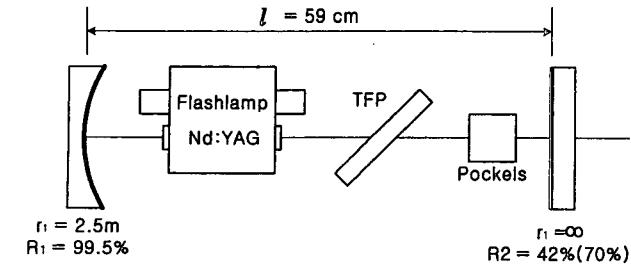


그림 1. 레이저 발진기 구성도.

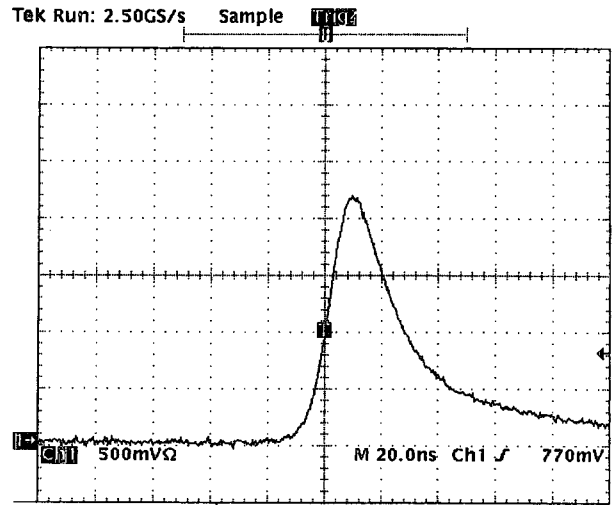


그림 4. 쌍용 결정의 TEM<sub>00</sub> Q스위칭 레이저 펄스 파형.

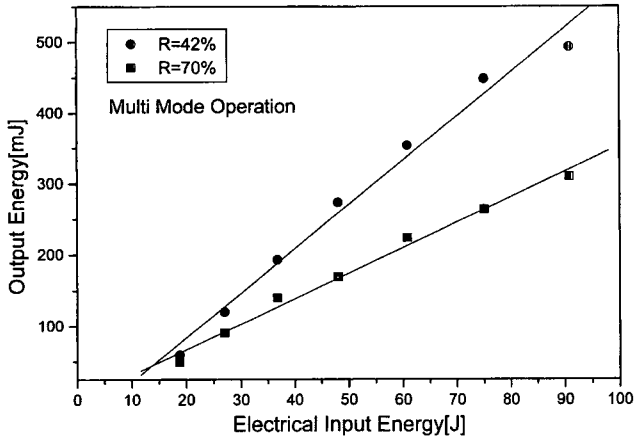


그림 2. 출력경 반사율 42%, 70%의 다중모드 출력.

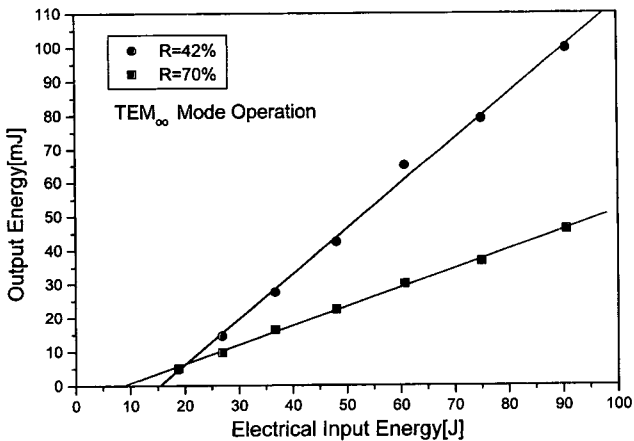


그림 3. 출력경 반사율 42%, 70%의 TEM<sub>00</sub>모드 출력.

에너지를 얻었으며 이 결과가 그림 2에 보이고 있다.

TEM<sub>00</sub> 모드에서는 90 J에 대하여 100 mJ, 레이저 변환 효율 0.11%을 얻을 수 있었다. 이 사항이 그림 3에 소개되었다. 이 실험에서는 두 종류의 출력경으로 반사율을 변화시켰고, 이에 대한 각각의 문턱에너지를 확인하였다. 얻어진 문턱에너지는 반사율 42%에서 15.1 J, 기울기 효율은 0.13%로 계산되었다.

Q-스위칭 발진은 LiNbO<sub>3</sub>(9×9×25.4 mm)와 박막형 편광기로 구성된 Pockels cell을 사용하였으며, 구동 전압은 약 1500V 전후이었고, 섬광관 동작과는 280 μs의 지연시간으로 정밀 조정하여 실험을 수행하였다. 그림 4는 TEM<sub>00</sub> Q-스위칭 레이저 펄스 파형을 디지털 오실로스코프(Tektronix TDS

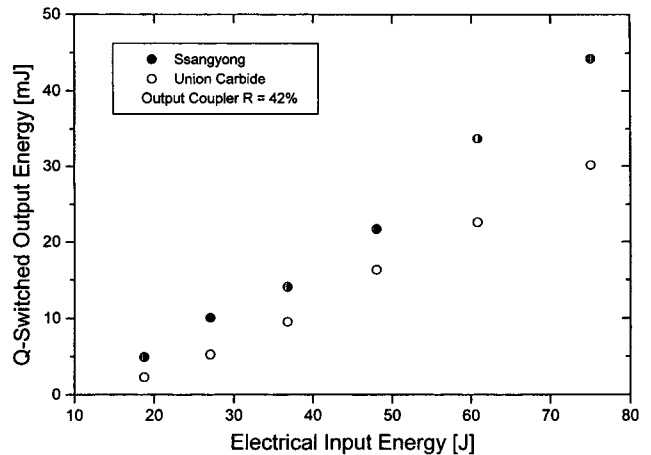


그림 5. Q-스위칭 출력.

684B)로 측정된 것이다. 레이저 펄스 상승시간은 14 ns이고, 반치폭은 30 ns로 최대 출력은 1.5 MW를 얻을 수 있었으며, 반복률은 10 pps까지 가능하였다. 그림 5에서와 같이 쌍용 Nd:YAG 결정과 Union Carbide 레이저 결정에 의한 Q스위칭 실험결과를 보면 국산결정이 출력면에서 오히려 우수하였다.

### 2.3. 위상파면 분석

동일한 공진기내에서 레이저 결정만을 변화시켰을 때 나타나는 위상파면의 차이는, 그 결정이 갖고 있는 물리적 특성에 의한 변화에 기인하므로 다중모드를 발생시키는 공진기 조건에서 Nd:YAG 결정만을 교환한 후 레이저 결정의 차이에 의한 위상파면의 변화를 조사하였다.

레이저 광속의 위상파면을 분석하기 위해 평면파인 기준 광속을 기준으로 하여 알고자 하는 시험광속의 위상파면을 분석하는 푸리에 분석법을 사용하였다. 이를 위하여 Mach-Zehnder 간섭계를 구성하였다. 광속분할기에 의해 분할된 한 쪽 광경로의 광속은 광속확대기를 통하여 평면 기준파로 사용하고, 다른 경로를 지난 광속은 시험광속으로서 이들 두 광속의 중첩에 의해 간섭무늬를 얻을 수 있었다. 이로부터 간섭

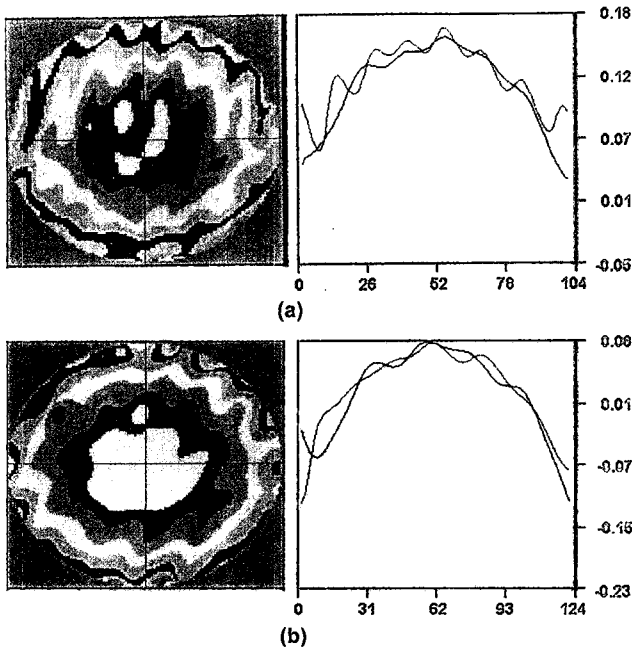


그림 6. (a) 쌍용 결정의 위상파면, (b) Union Carbide 결정의 위상파면.

무늬를 CCD로 검출하여 frame grabber에 의해 저장한 후, 연구실에서 개발한 fringe analysis program을 사용하여 시험광속의 위상파면을 분석하였다.<sup>[5-7]</sup>

그 분석결과는 그림 6과 같다. 쌍용 Nd:YAG결정으로부터 얻은 레이저빔의 위상파면은 약 0.18λ 정도 왜곡되어 있으며(그림 6a), Union Carbide Nd:YAG결정으로부터 얻은 레이저빔의 위상파면은 약 0.16λ 정도(그림 6b) 왜곡된 것으로 분석되었다. 그러나 본 연구에서 사용한 프로그램은 대략 λ/30 이하의 정확도를 가지고 위상파면 분석을 할 수 있으므로 두 결정 모두 비슷한 결과임을 확인할 수 있었다.

2.4. 제2조화파 발생

이러한 광학적 특성을 갖는 레이저 결정으로 발전된 레이저 광 출력으로부터 KTP를 사용하여 제2종 위상정합방법으로 제2조화파를 발전하였다.<sup>[8]</sup> 제2종 위상정합은 선편광된 레

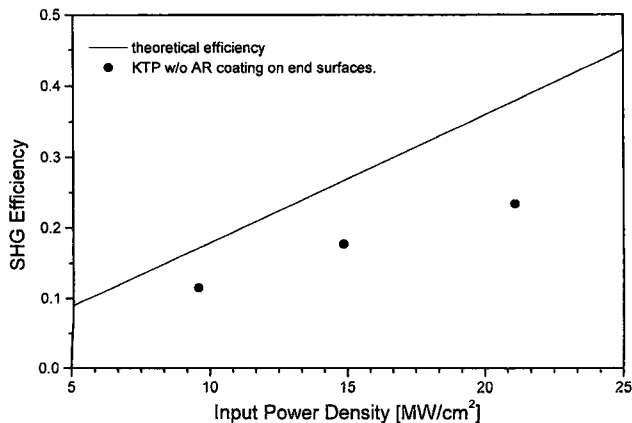


그림 7. 제2조화파 발전 변환 효율.

이저 빔을 λ/2 위상 지연판을 사용하여 편광방향을 KTP결정의 z축에 대하여 45도 회전시키고 제2조화파의 출력이 최대로 발생하는 각을 확인하고 발전 실험을 수행하였다. 사용한 KTP결정은 크기가 약 5×5×5 mm로 결정의 표면은 무반사막을 가지고 있지 않은 것을 사용하였다. 발생한 제2조화파의 변환효율을 측정하기 위하여 532 nm의 파장만을 투과시키는 간섭필터를 설치하여 제2조화파의 에너지만을 측정하였다. 입력파의 에너지를 증가시키며 이에 따른 제2조화파의 출력 에너지를 측정하였다. 그림 7은 입력파의 파워밀도에 대한 제2조화파 변환효율을 나타낸 것이다. 입력파의 파워 밀도가 21 MW/cm<sup>2</sup>일때 최대 23%의 SHG변환효율을 얻었다. 23%는 근래에 이루어지고 있는 변환효율에 비하여 낮게 나타났다. 이는 사용하는 KTP결정의 비선형 광학계수와 절단각의 부정확도에 따른 위상정합의 결여와 KTP 양단면에 1.06 μm에 대한 AR 코팅을 하지 않은 것에 기인한다.

2.5. 반사율 변화에 의한 이득측정(Method I)

이득을 측정하는 방법으로는 출력경의 반사율의 차이에 의한 문턱 에너지의 차이를 측정하여 이득을 계산하는 방법(Method I)과 같은 파장의 레이저 발전 출력을 이득을 알려고 하는 레이저 매질에 입사하여 입력에너지와 출력에너지의 비율로부터 이득을 측정하는 방법(Method II)<sup>[2,3]</sup>이 있다. 방법 II의 실험에서는 두 섬광관 사이에서 섬광 출력시간에 대한 시간지연 조절이 매우 정밀하게 이루어져야 한다. 방법 I은 반사율이 서로 다른 출력경으로부터 레이저 출력을 각각 측정하고, 최소자승법으로 맞추어 문턱 입력 에너지를 계산하고, 다음과 같은 관계로부터 단일경로 이득계수를 계산하였다.

소신호 이득 G<sub>0</sub>(small signal gain)는 이득매질에 흡수되는 광 흡수 계수 K와 입력에너지 P<sub>in</sub>에 의존한다.

$$\ln G_0 = g_0 l = K P_{in} \tag{1}$$

여기서 g<sub>0</sub>는 이득계수이며, l은 이득매질의 길이이다. 문턱조건에서 공진기내의 광학 부품에서 보여지는 반사, 산란, 흡수와 출력경에서의 투과광에 대한 손실을 모두 고려한 손실 L과 출력경의 반사율 R<sub>out</sub>에 관한 식으로 고려해 보면

$$2g_0 l = L - \ln R_{out} \tag{2}$$

식(1)과 (2)로부터 다음과 같은 관계를 알 수 있다.

$$2K P_{th} = L - \ln R_{out} \tag{3}$$

식 (3)에서 반사율 R<sub>out</sub>의 반사율을 각각 R<sub>1</sub>과 R<sub>2</sub>로 바꾸어 전기 입력 에너지에 따른 출력에너지를 측정하고, 문턱에너지 P<sub>th1</sub>과 P<sub>th2</sub>를 각각 계산하면 식(3)에 의한 연립방정식으로부터 펌핑계수 K와 출력경의 반사율에 의한 손실을 제외한 공진기내 손실 L의 해를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K = \frac{\ln \left( \frac{R_1}{R_2} \right)}{2(P_{th2} - P_{th1})}, \quad L = \frac{P_{th2} \ln R_1 - P_{th1} \ln R_2}{P_{th2} - P_{th1}} \tag{4}$$

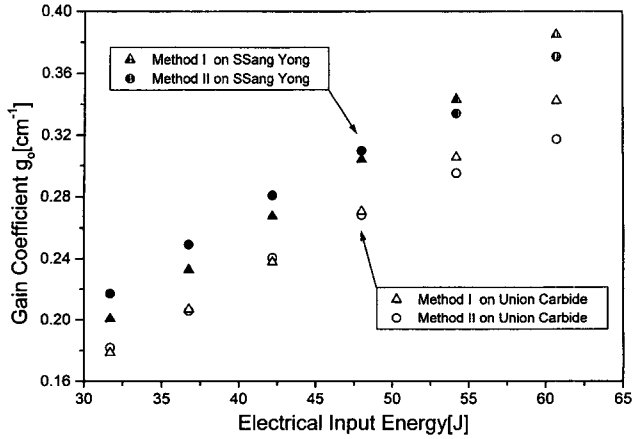


그림 8. 단일 경로 이득 계수.

이 해로부터 소신호 단일경로 이득을 측정하기 위한  $P_{th1}$ ,  $P_{th2}$  은 측정값으로부터 알 수 있으며,  $R_1$ ,  $R_2$ 는 알고 있는 값이므로 식(1)로부터  $G_0$ 를 계산할 수 있었다.<sup>[4]</sup> 그림 3에 의하여 측정된 문턱입력에너지를 반사율과 함께 식(4)에 대입하여 계산한 결과, 펌핑계수  $K$ 는  $0.0399 \text{ J}^{-1}$ 이었으며, 손실  $L$ 은  $0.338$ 의 결과를 얻었다. 42% 반사율을 갖는 출력경에 의한 문턱에너지에서의 단일경로 이득계수  $g_0$ 는  $0.0956 \text{ cm}^{-1}$ 이며, 입력에너지 변화에 따른 단일 경로 이득계수를 그림 8에서 삼각형의 점으로 표시하였다. 이 결과와 비교 검증하기 위하여 Union Carbide사의 Nd:YAG 결정에 의한 펌핑계수  $K$ 는  $0.0355 \text{ J}^{-1}$ 이었으며, 손실  $L$ 은  $0.239$ 의 결과를 얻었다. 이로부터의 단일 경로 이득계수는  $0.0879 \text{ cm}^{-1}$ 임을 알 수 있었다.

두 제품의 단일 경로 이득은 방법 I에 의하여 측정해 본 결과 국내 제품이 보다 우수한 결과를 얻을 수 있었다. 이러한 방법으로 계산 측정하는 단일 경로 이득계수  $g_0$ 의 값은 최소 자승법에 의해 구해지는 문턱에너지에 의해 오차가 전파되므로, 출력 분포를 정확히 측정하여야 한다.

**2.6. 광펄스 입력에 의한 이득측정(Method II)**

같은 파장의 레이저 광펄스로 알고자 하는 레이저 증폭매질에 입사시키는 증폭 과정은 율방정식과 광자수송방정식으로 표현된다. 이 방정식의 해는 Frantz와 Novdviik<sup>[9]</sup>에 의하여 식 (5)로 풀이 할 수 있다. 여기서 이득  $G_0$ 는 입력광 펄스의 증폭도를 나타낸다.

$$G_0 = \frac{E_o}{E_i} = \frac{E_s}{E_i} \ln \left\{ 1 + \exp(\sigma \Delta N L_D) \left[ \exp\left(\frac{E_i}{E_s} - 1\right) \right] \right\} \quad (5)$$

여기서  $E_o$ 와  $E_i$ 는 각각 증폭된 출력 광펄스에너지와 이득매질에 입사시킨 입력광펄스에너지이다.  $E_s$ 는 이득매질의 특성을 나타내는 포화에너지이고,  $\Delta N$ 은 밀도반전분포,  $L_D$ 는 이득매질의 길이,  $\sigma$ 는 유도 방출 단면적이다. 위식은 두가지 경우에 있어서 간략하게 소신호 증폭과 대신호 증폭으로 표현된다. 소신호 증폭 ( $E_i < E_s$ )의 경우  $G \approx \exp gL_D$ 로 표현되며, 대

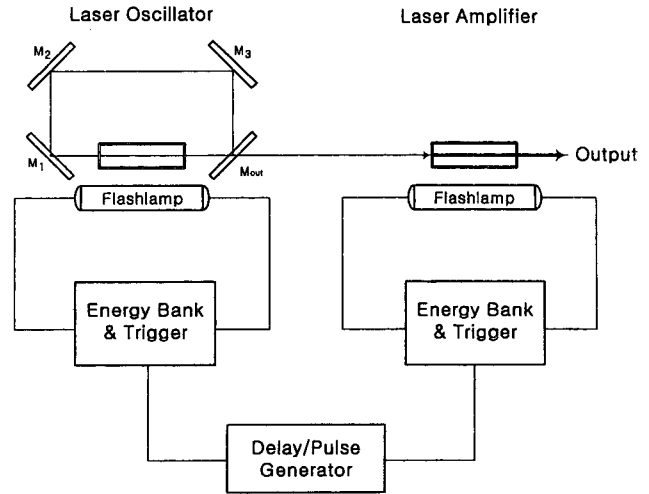


그림 9. 레이저 이득측정을 위한 실험장치.

신호 증폭 ( $E_i > E_s$ )의 경우  $G \approx 1 + \frac{E_s}{E_i} gL_D$ 로 표현된다. 본 실험에서는 입력광 펄스 에너지가 1.5 mJ로 포화에너지 82.9 mJ에 비하여 적은 값을 가지므로 소신호 증폭의 표현식을 사용하였다.

레이저 발생기와 레이저 증폭기는 그림 9와 같이 설치하였다. 좌측의 고리형 Nd:YAG 레이저로부터의<sup>[10]</sup> 레이저 펄스출력을 2개의 렌즈로서 광속의 크기를 조절하여 입사시켰다. 증폭기의 밀도 반전이 최고점에 도달하였을 때 레이저 발생기로부터 출력된 빔이 증폭기에 도착될 수 있도록 1 ps까지 조절가능한 Stanford Research systems의 Digital Delay/Pulse Generator (Model DG535)를 사용하여 섬광관 펄스의 시간을 조절하였다. 그림 10은 레이저 발생기와 증폭기의 섬광시간을 변화시켜가며 측정된 결과이다. 레이저 증폭기의 펄스 섬광을 시작할 때 100  $\mu\text{s}$  시간이 경과 후 레이저 발생기의 펄스 섬광을 시작할 때 최대 출력을 얻었다. 그림 8에 은 레이저 매질의 길이(63 mm)를 고려한 단위 길이당 이득인 소신호 단일 경로 이득계수  $g_0$ 의 그래프이다. 섬광관에 가해주는 전기입력 에너지가 48 J일 때, 출력경의 반사율을 변화시켜 측정하

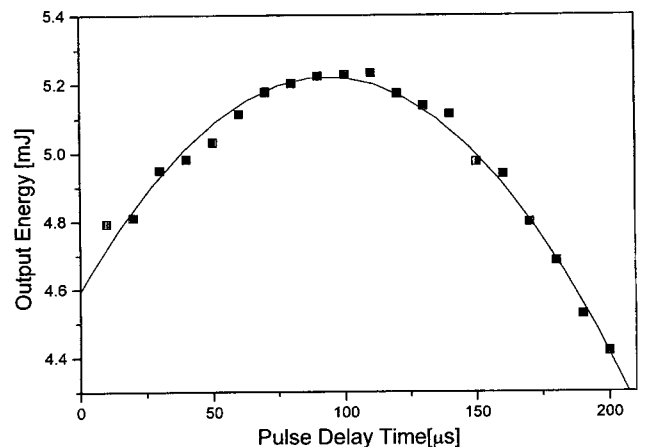


그림 10. 시간 지연 변화에 따른 출력 분포.

(Method I) 단일경로 이득계수는  $0.304 \text{ cm}^{-1}$ 이었으며, 레이저 증폭기를 이용한(Method II) 단일경로 이득계수 측정값은  $0.309 \text{ cm}^{-1}$ 로 결과적으로 두 방법 모두 단일 경로 이득계수의 값이 거의 일치하였다. 이는 방법 I이 두 대의 장비를 설치하는 비용과 시간등을 적게 들이고 측정하는 방법 II에 비하여 매우 효율적임을 증명하는 것이다.

비교평가를 위하여 사용한 Union Carbide사 Nd:YAG결정에 의한 단일 경로 이득계수를 측정하였다. 그림 9에 표시된 결과를 보면, 전기입력에너지 48 J에서  $0.270 \text{ cm}^{-1}$  및  $0.268 \text{ cm}^{-1}$ 의 이득계수를 얻을 수 있었다. Union Carbide사의 제품에서도 두 방법에 의한 단일 경로 이득계수가 거의 일치하는 것을 볼 수 있었다.

그러나 두 결정 모두에서 전기입력에너지가 큰 경우에는 포화에너지 밀도에 접근함에 따라 에너지 이득이 점점 포화되는 경향을 보이고 있는 것으로 분석이 된다. 그러므로 앞으로 보다 큰 전기입력에너지에서의 레이저 출력 분포 조사와 입력광 펄스 에너지를 포화에너지보다 더 크게 입사시켰을 때의 이득이 반사율 변화에 의한 측정 방법과 비교 조사할 필요가 있다.

### III. 결 론

국내 레이저 결정의 상업용 국산화를 위하여 Czochralski 법에 의해 성장시킨 Nd:YAG결정의 레이저 펄스 출력 특성을 실험적으로 조사하여 보았다. 레이저 펄스 출력이 외국사 제품에 비하여 정상발전 출력 에너지, Q-스위칭 펄스 출력, 위상파면 특성, 단일경로 이득계수 등이 오히려 좋거나, 비슷한 결과를 얻을 수 있었다.

또한 이득계수의 정확성을 확인하기 위하여 레이저 발생기와 증폭기를 구성하고, 레이저 입력에너지와 출력에너지의

비율로부터 단일 경로 이득을 계산하였다. 이들의 결과로부터 레이저 매질의 단일 경로 이득을 측정하기 위하여 레이저 발전기 및 증폭기를 구성하여 이득을 측정하는 것보다 레이저 발전기의 출력경의 반사율을 변화시켜 그 출력 분포를 측정함으로써 보다 간단히 레이저 이득을 계산할 수 있음을 알 수 있었다.

쌍용 중앙연구소에서 성장시킨 결정의 펄스 출력의 우수성을 확인 할 수 있었으며, 국산 레이저 결정의 양산화를 기대 할 수 있다.

### 참고문헌

- [1] J. E. Geusic, H. M. Marcos, L. G. Van Uitert, Appl. Phys. Lett. **4**, 182 (1964).
- [2] 이상호, 김현태, 배소익, 정수진, 한국광학회지, **9**, 175 (1998).
- [3] T. G. Barton, R. L. Guttenberger and H. J. Foth, Appl. Opt. **34**, 2004 (1995)
- [4] W. Koechner, *Solid-State Laser Engineering*, 97-103, Springer-Verlag (1976).
- [5] S. H. Choi, D. Y. Park, S. G. Lee, J. Opt. Soc. Kor. **5**, 445 (1994).
- [6] D. Y. Park, S. H. Choi, S. G. Lee, J. Opt. Soc. Kor. **6**, 288 (1995).
- [7] 최승호, 박대윤, 김기식, 이승걸, 제3회 레이저 분과학 심포지움 논문집(KPS, OSK, KAERI), **3**(4), 213 (1995).
- [8] R. L. Sutherland, *Handbook of Nonlinear Optics*, 44-86, Marcel Dekker, Inc, 1996.
- [9] L. M. Frantz and J. S. Nodvik, J. Appl. Phys. **34**, 2346 (1963).
- [10] S. H. Choi, K. S. Kim, D. Y. Park, J. Opt. Soc. Kor. **8**, 107 (1997).

## Output characteristics and measurement of the gain coefficient of a pulsed Nd:YAG laser

Dae-Yoon Park, Hyun Tae Kim and Chul Chae Choi  
Dept. of Physics, Inha University, Incheon 402-751, Korea

Sang Ho Lee and Han Tae Kim  
New Ceramic Research Team, SsangYong Research Center, Taejeon 305-345, Korea

(Received November 12, 1998, Revised manuscript received December 24, 1998)

We established the laser oscillator using Nd:YAG crystal grown at Ssang Yong company in Korea and investigated the characteristics of oscillation, Q-switching and wave front of output beam. We measured the single pass gain by controlling the threshold input energy with two output couplers of different output reflectances. Moreover, we compared the gain measured by different output couplers with the gain directly measured by the laser amplifier. The peak power of Q-switching, the pulse width, and the single pass gain coefficient at the threshold energy were 1.5 MW, 30ns, and  $0.0958 \text{ cm}^{-1}$  respectively and they were compared with those of the commercial Nd:YAG crystal. Our crystal was proved to be as good as the commercial crystal.