

반도체레이저 여기 세라믹 Nd:YAG 레이저에서 Q-스위칭 동작 최적화

신동준[†] · 김병태

청주대학교 레이저광정보공학과
☎ 360-764 충북 청주시 상당구 내덕동 36번지

김덕래

단국대학교 의학레이저의료기기연구센터
☎ 330-714 충남 천안시 안서동 산 29번지

(2008년 7월 28일 받음, 2008년 8월 20일 수정본 받음, 2008년 8월 20일 게재 확정)

광섬유 연결 반도체레이저 여기 세라믹 Nd:YAG 레이저의 전기광학 Q-스위칭 출력 특성에 대해 연구하였다. 세라믹 Nd:YAG 레이저의 Q-스위칭은 여기원의 펄스폭 1,000 μ s, 출력 거울의 반사율 77% 및 지연시간 985 μ s에서 최적화되었다. 여기 에너지 17.9 mJ에서 0.35 mJ의 Q-스위칭된 출력 에너지와 약 4 ns의 펄스폭이 측정되어 1.9%의 출력 효율과 87.5 kW의 첨두 출력을 나타내었다.

주제어: Laser, Nd:YAG Ceramic, Diode-pumped, Electro-optic Q-switching

I. 서 론

레이저는 광정보, 재료 가공, 군산업 및 의료용은 물론 과학 연구 전반에 걸쳐서도 널리 사용되고 있으며, 최근에는 이들 분야에서 레이저에 대한 수요가 급증하고 있다. 고체레이저는 고출력 펄스 동작에 적합하여 미세 가공을 필두로 하는 각종 산업 응용에 폭넓게 사용되고 있으며, 고출력 고체레이저의 시장성이 커짐에 따라 저가이면서도 다양한 크기에 우수한 품질을 나타내는 레이저 매질에 대한 요구가 증대되고 있다.^[1-3]

현재 고출력 고체레이저 개발에서는 Nd:YAG 단결정이 주로 이용되고 있다. 초크라스키(Czochralski) 방법으로 제작된 Nd:YAG 단결정은 제작 비용과 기간이 많이 소요되고, 작은 매질 크기와 활성 이온의 첨가율이 낮다는 것이 향상된 고출력 레이저 개발에 걸림돌로 작용하였다. 단결정 매질의 단점을 보완하면서 물리·광학적으로도 우수한 특성을 나타내며, 레이저 매질로서의 성능도 향상된 다결정(polycrystalline)인 세라믹 Nd:YAG가 연구 개발되기 시작하였다.^[4-6]

세라믹 Nd:YAG는 1995년 초에 고온 압축법으로 개발되었으나, 매질 내부에서의 산란이 심해 마이크로칩 레이저용으로 국한되어 사용하였다.^[7] 1998년 들어 나노입자 상태의 Al₂O₃, Y₂O₃ 및 Nd₂O₃ 분말 원료를 고온, 고압의 진공 상태에서 소결시켜 매질을 제작하는 진공 소결법이 개발되어^[8] 다결정 레이저 매질의 제조는 새로운 국면을 맞이하였다. 진공 소결법으로 제작한 세라믹 Nd:YAG는 매질 내부에 세공 및 기포가 감소하여 투명도와 산란 손실이 크게 개선되고, 단결정 못지않은 우수한 품질을 갖게 되었다.^[9] 세라믹 Nd:YAG의

열적 특성인 열전도도와 열팽창률은 Nd:YAG와 유사하고, 열충격(thermal shock) 파라미터는 1,290 W/m로 1.5배, 굽힘강도(flexural strength)는 360 Gpa로 1.3배, 빅커스 경도(Vickers hardness)는 15.0~16.1 Gpa로 1.1배, 그리고 파괴 인성(fracture toughness)은 5.2~8.8 MPam^{1/2}로 최대 5배 크다.^[10,11] 또한 활성이온을 최대 8 at.%까지도 첨가시킬 수 있어^[12] 여기 에너지의 흡수율을 크게 높일 수 있는 장점도 있다. Nd³⁺의 첨가율이 2 at.%인 세라믹 Nd:YAG의 경우 형광 수명은 174 μ s이고, 흡수 계수는 20.8 cm⁻¹로 Nd:YAG 결정에 비해 4배 이상 높으며 Nd:YVO₄와 비교해도 2/3에 해당하는 큰 값을 갖는다.^[13] 이 같은 특징을 가지고 있는 세라믹 Nd:YAG는 고출력 레이저 매질로 활용 가능성이 기대되었다. 그러나 지금까지 연구된 결과에 의하면 Nd³⁺의 첨가율이 2 at.% 이상으로 높아짐에 따라 흡수 계수가 커지게 되고, 매질에서 열렌즈 효과를 초래하여 레이저 출력 및 빔질에 영향을 주는 것으로 보고되었다.^[14] 세라믹 Nd:YAG는 반도체레이저 여기 고체레이저 매질로도 이상적인 조건을 갖추고 있고, 세계 각국에서 연구가 시작되어 2000년 초에는 465 mW, 2000년 말에는 31 W, 2001년 초에는 88 W의 출력이 발표되었으며, 2001년 중순에는 일본 전기통신대학의 Kenichi Ueda 교수팀에 의해 1.46 kW의 고출력 세라믹 Nd:YAG 레이저가 개발되기도 하였다.^[4,9,15]

세라믹 Nd:YAG는 고효율의 고출력 레이저용 매질로 활용 가능성이 높아 크게 주목받기 시작하였으나, 지금까지의 연구 발표는 연속 발진에 관한 것이 대다수를 이루고 있다. 고강도의 레이저 펄스를 얻기 위한 Q-스위칭 출력 특성에 대한 연구로는 2002년에 포화흡수체를 이용한 세라믹 Nd:YAG 레이저가 개발되어, 12 kHz의 반복 동작률에서 20 ns의 펄스 폭과 190 W의 첨두 출력이 보고되었다.^[16] 2005년에는 음향

[†]E-mail: jiwahajota@hanmail.net

광학소자를 이용하여 160 kHz의 반복 동작률에서 100 ns의 펄스폭과 10 W의 평균 출력이 발표되었고,^[17] 2007년에 전기광학소자를 이용하여 반복 동작률 10 Hz에서 펄스폭 10 ns를 갖으며 출력 에너지가 50 mJ인 레이저가 개발되었다.^[18] 그러나 아직도 고출력을 향한 능동형 Q-스위칭 세라믹 Nd:YAG 레이저에 대한 연구는 상당히 미비한 실정이다.

본 논문에서는 광섬유 연결 반도체레이저를 여기원으로 하는 단면여기 세라믹 Nd:YAG 레이저의 능동형 Q-스위칭 출력 특성에 대해 기술한다.

II. 실험장치

그림 1은 세라믹 Nd:YAG 레이저의 Q-스위칭 실험장치도이다. 여기원으로는 광섬유 연결 반도체레이저(Apollo Ins.; F25-808-4P)를 사용하였다. 여기원의 출력부는 표준형 SMA-905 광섬유 커넥터로 연결되어 있으며, 광섬유의 코어 직경은 400 μm 이고, 수치구경은 0.22이다. 반도체레이저의 온도는 모듈 내부에 온도를 측정할 수 있는 써미스터(thermistor)와 열전소자가 연결된 온도조절기(Newport; 350)로 조절하였으며, 열전소자에서 방출되는 열은 수냉식 방열판을 부착하여 냉각시켰다. 반도체레이저, 열전소자 및 수냉식 방열판 사이에 열전도 그리스(grease)를 얇고 고르게 발라 열전도가 잘 되도록 하였다. 반도체레이저의 온도 27.5°C에서 45 A의 동작 전류를 인가시켰을 때 반도체레이저의 발광 스펙트럼은 중심 파장 809 nm에서 3 nm의 반치폭을 나타내었으며, 이때의 출력은 27.5 W이다. 여기원은 구동 전류원(HP; 6011A)에 펄스 발생기(Avtech; AVO-8B-C-M-P)를 연결하여 펄스로 발진시켰으며, 인가 전류는 대전류용 탐침기(Tektronix; A622)를 오실로스코프(HP; 54542A)에 연결하여 확인하였다. 반도체레이저와 구동 장치로 구성된 회로에서 일어나는 과도 현상을 억제하며, 역전류로부터 반도체레이저를 보호하기 위하여 구동 장치와 반도체레이저 사이에 안전저항과 쇼트키다이오드로 구성된 안전회로를 설치하였다.

세라믹 Nd:YAG 레이저의 여기 방법은 광섬유 연결 반도체레이저를 사용하여 단면 여기법을 이용하였다. 여기에너지를 효과적으로 집속시키기 위해 초점심도를 길게 설계 제작한, 렌즈 6개로 구성된, 집속광학계는 유효초점거리 10.9 mm에서 380 μm 의 빔직경에 투과율은 91.6%를 나타내었다.^[14] 공진기는 모드 정렬의 어려움이 거의 없는 안정된 반구면 공진기로 808 nm에서 무반사, 1,064 nm에서 전반사의 이색성 코팅을 한 10×20×2¹ mm 크기의 평면 거울과 곡률 반경이 120 mm인 출력 거울로 구성하였다. 세라믹 Nd:YAG(Baikowski)는 Nd³⁺의 첨가율이 2 at.%이며, 직경 5 mm, 길이 10 mm 크기로 평면 거울에 밀착시켰다. 레이저 매질 홀더는 세라믹 Nd:YAG에서 발생된 열을 효율적으로 전달시킬 수 있도록 열전도도가 좋은 구리를 이용하여 수냉식 냉각판과 일체형으로 제작하였다. 레이저 매질은 열전도도가 좋은 인듐 포일로 둘러싸서 홀더 중심에 장착하여 매질에서 발생된 열을 잘 방출시킬 수 있도록 하였다.

Q-스위칭은 직경이 10 mm인 포켈스 소자(Cleveland Crystals; QX1020)를 사용하였다. 레이저 발진 파장인 1,064 nm에 대한 포켈스 소자의 투과율은 91.4%로 측정되었다. 여기원과 포켈스 소자의 인가 전압이 0 V가 되는 지연시간은 반도체레이저 구동원에 지연 펄스 발생기(Standford Research System; DG535)를 연결하여 조절하였으며, 고전압 펄스 발생기(Laser-metrics; GP4)는 지연 펄스 발생기로부터 신호를 받아 포켈스 소자에 3.1 kV의 고전압 펄스를 인가시켜준다. 본 실험에서는 반도체레이저 여기에 의해 발진된 광을 수평 편광으로 만들기 위해 35×20×2¹ mm 크기의 편광자를 광축에 대해 57°가 되도록 설치하였으며, 1,064 nm 파장에 대해 94.3%의 투과율을 나타내었다. Q-스위칭 펄스 파형은 편광자에서 반사된 레이저 광을 상승시간이 60 ps인 biplanar 광전관(Hamamatsu; R1328U-01)을 오실로스코프에 연결하여 측정하였고, 출력 에너지는 에너지 미터(Melles Griot; 01PEM001)를 이용하여 측정하였다.

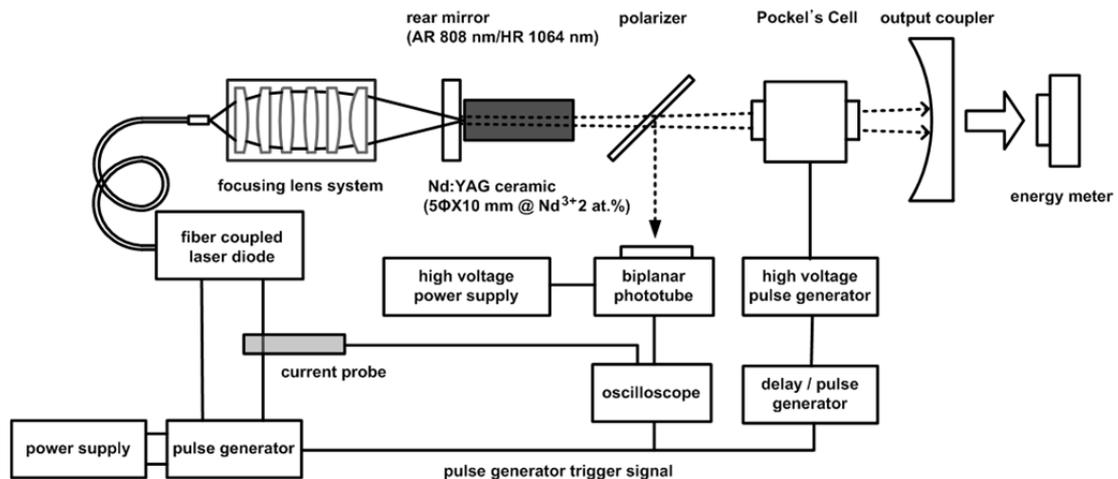


그림 1. 세라믹 Nd:YAG 레이저의 Q-스위칭 실험장치도.

III. 실험 결과 및 해석

그림 2는 여기 에너지에 따른 정상발진 출력 에너지이다. 실험에서 여기원의 펄스폭은 정상발진 출력이 가장 높게 나타난 1,000 μs 으로 설정하였다. 일반적으로 Nd:YAG 레이저의 경우 여기원의 펄스폭이 300 μs 근처에서 최대값을 보이는 것과 비교하였을 때 세라믹 Nd:YAG는 여기원의 에너지를 3배 이상 더 효율적으로 사용할 수 있는 레이저 매질인 것을 의미하기도 한다. 그리고 최대 출력 효율을 확인하기 위해 반사율이 서로 다른 출력 거울을 이용하고, 여기원을 동작 전류까지 올리면서 측정하였다. 세라믹 Nd:YAG 레이저의 출력 에너지는 그림 2(a)에서와 같이 여기 에너지에 따라 선형적으로 증가한다. 그림 2(b)는 그림 2(a)의 A 영역을 확대한 것으로 반사율이 77%인 출력 거울을 사용하였을 때 입력 에너지 17.9 mJ에서 출력 에너지는 7.9 mJ로 나타났다. 이때 최대 출력 효율과 기울기 효율은 각각 44.2%와 48.6%로 나타났다. 여기 에너지에 따른 출력 에너지가 선형적으로 증가하는 것으로 보아 연속 발진과 다르게 펄스 발진에서는 여기 에너지의 밀도가 낮아 열렌즈 효과에 의한 출력 에너지의 변화가 나타나지 않는 것으로 판단된다. 일반적으로 출력 거울의 반사율에 따라 발진 문턱값과 레이저 출력의 변화가 크게 나타나는데 세라믹 Nd:YAG 레이저에서는 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 세라믹 Nd:YAG의 형광 수명과 유도방출 단면적의 곱이 크기 때문에 발진 문턱값은 작아지고, 그만큼 출력 거울의 반사율에 대한 발진 문턱값의 변화도 작아지기 때문인 것으로 생각된다. 출력 거울의 반사율에 따른 레이저 출력의 변화가 작은 것은 레이저 매질의 내부 손실이 Nd:YAG에 비해 2/3로 낮을 뿐만 아니라 공진기 내부 손실 에너지의 변화가 작기 때문인 것으로 생각된다.^[14] 이는 기존의 Nd:YAG 결정에 비해 세라믹 Nd:YAG를 이용 시 출력 거울의 반사율 선택에 대한 허용 관용도가 높아 레이저 제작에 좀더 수월할 것으로 생각된다.

세라믹 Nd:YAG 레이저의 Q-스위칭 최적화를 위해 여기원의 트리거 신호와 포커스 소자의 지연시간을 변화시켜가며 Q-스위칭된 상태의 레이저 출력 파형과 출력 에너지를 측정하였다. 그림 3은 여기원의 전류 파형과 지연시간 이후의 레이저 출력 파형이다. 그림에서 c1은 대전류용 탐침기로 측정된 여기원의 입력 전류 펄스폭이고, c2와 c3는 레이저 펄스를 각각 biplanar 광전관과 포토다이오드(Newport; 818-BB-20)로 동시에 측정한 파형이다. 실험에서 추가적으로 사용된 포토다이오드의 상승시간은 0.2 ns이다. 실험에서는 레이저 펄스 파형을 다각적으로 파악하기 위해 biplanar 광전관과 포토다이오드의 연결저항을 각각 50 Ω 과 1 M Ω 으로 설정하였다. 여기서 연결저항을 1 M Ω 으로 설정하면 빠른 레이저 펄스 파형을 측정할 수 없더라도 50 Ω 과 다르게 작은 신호를 측정할 수 있기 때문에 이를 이용하였다. 그림 3(a)는 지연시간 100 μs 에서 측정된 값이다. c1에서 여기원의 펄스폭이 1,000 μs 인 것을 볼 수 있다. c2의 경우 지연시간 지점에서 Q-스위칭된 레이저 펄스 파형을 확인할 수 있다. c3에서는 지연시간 이전 동안에는 레이저 펄스 파형이 측정되지 않았지만, 지연시간 이후에서는 정상발진 파형이 측정되었다. 그림 3(b)와 그림 3(c)는 각각 지연시간 500 μs 와 985 μs 에서 측정된 결과이다. c2의 경우 Q-스위칭된 레이저 펄스폭은 지연시간 985 μs 에서 최소값을 나타내었다. c3에서는 지연시간 이후 정상발진 파형의 크기는 지연시간이 길어질수록 감소하였다. 이는 Q-스위칭 발진이 일어난 후에 입력되는 여기 에너지가 정상발진 상태로 출력되어 출력 에너지에 영향을 준 것으로 판단된다. 최적화된 Q-스위칭 조건을 찾기 위해서는 출력 에너지 중에서 정상발진된 출력 에너지를 제외시킨 Q-스위칭된 출력 에너지만 얻어야 한다. Q-스위칭된 출력 에너지는 펄스 면적과 비례 관계에 있으므로 지연시간과 여기원의 펄스폭을 같게 설정한 상태를 기준으로 지연시간에 따른 출력 에너지를 분석하였으며, 그 결과 지연시간이 985 μs 일 때 최대 출력 에너지를 나타내었다. 따라서 펄스폭, 펄

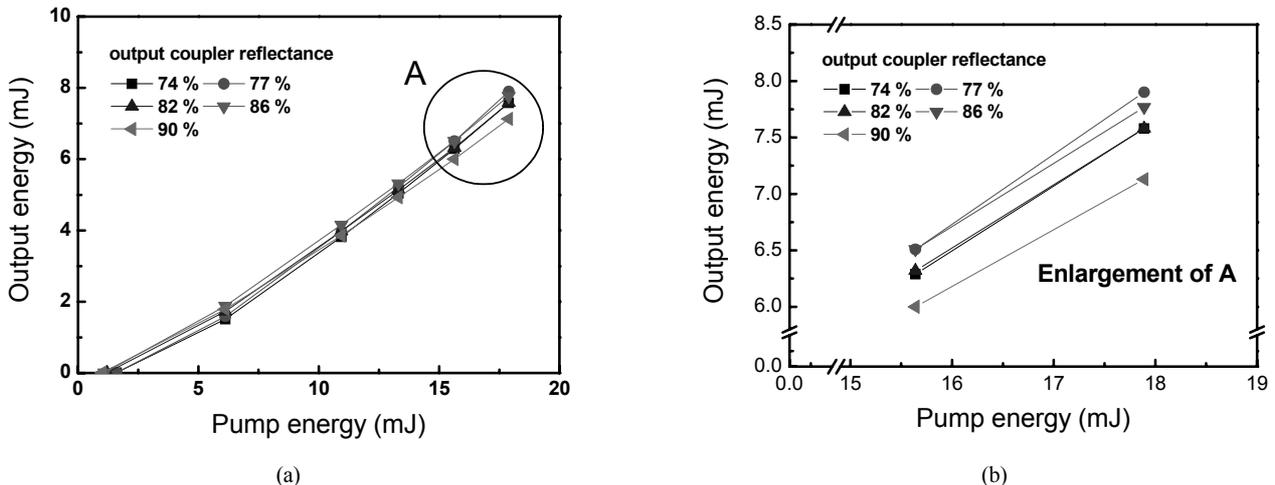
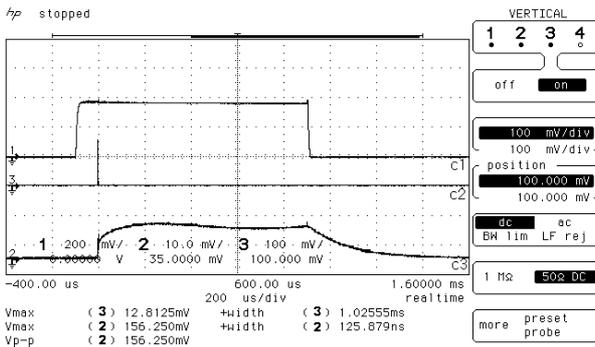
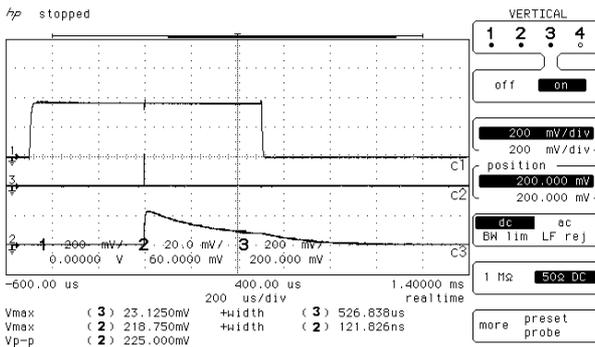


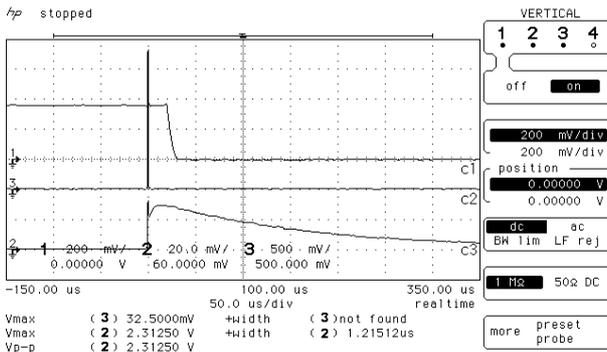
그림 2. 세라믹 Nd:YAG 레이저의 정상발진 특성.



(a) 지연시간 100 μs



(b) 지연시간 500 μs



(c) 지연시간 985 μs

그림 3. 여기원의 전류 파형과 지연시간 이후의 레이저 출력 파형.

스 파형 및 출력 에너지 등을 종합적으로 검토하면 Q-스위칭 최적화는 지연시간 985 μs에서 이루어지는 것으로 판단되며, 이를 바탕으로 세라믹 Nd:YAG 레이저의 Q-스위칭 출력 특성을 파악하였다.

그림 4는 레이저 공진기와 Q-스위칭 최적화 조건인 출력 거울의 반사율 77%, 여기원의 펄스폭 1,000 μs 및 지연시간 985 μs에서 여기 에너지에 따른 Q-스위칭된 출력 에너지와 펄스폭이다. 레이저 펄스폭은 biplanar 광전관에 연결된 프로브의 연결저항을 50 Ω로 설정한 후 측정하였다. 그림에서 ■는 출력 에너지, ●는 펄스폭으로 우측 좌표축을 사용하고 실선은 이론값이다. 출력 에너지는 여기 에너지에 따라 선형

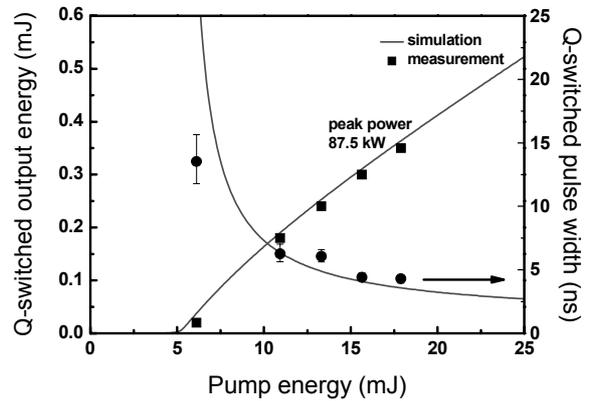


그림 4. 여기 에너지에 따른 Q-스위칭된 출력 에너지와 펄스폭.

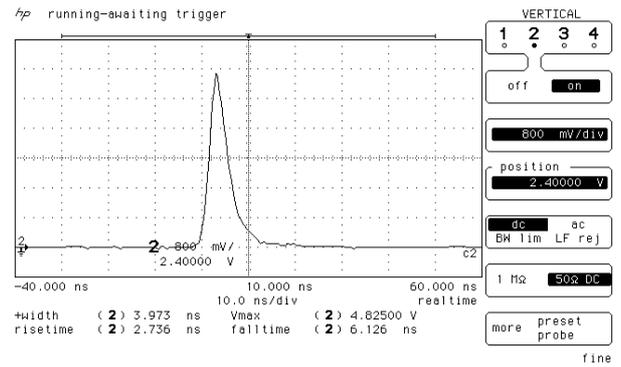


그림 5. Q-스위칭된 세라믹 Nd:YAG 레이저의 펄스 파형.

적으로 증가하여 17.9 mJ에서 0.35 mJ의 출력 에너지가 측정되어 1.9%의 출력 효율을 얻었으며, 첨두 출력은 87.5 kW를 나타내었다. Q-스위칭된 레이저의 펄스폭은 여기 에너지에 따라 지수 함수적으로 감소할 뿐만 아니라 실험 오차도 줄어들어 그림 5에서 볼 수 있듯이 최대 여기 에너지 17.9 mJ에서 약 4 ns으로 측정되었다. 펄스폭의 실험 오차는 문턱값 부근인 여기 에너지 6.1 mJ에서 14.2%를 나타내었고, 여기 에너지가 증가할수록 감소하였다. 문턱값 부근에서 오차가 크게 발생한 것은 여기 에너지가 작아 Q-스위칭 펄스가 제대로 생성되지 못하여 일그러졌기 때문인 것으로 생각된다. 세라믹 Nd:YAG의 Q-스위칭 출력 특성은 다음 식을 이용하여 이론적으로 해석하였다. 여기 에너지에 따른 출력 에너지는 식 (1)과 같다.^[19]

$$E = \int_0^{\infty} P(t) dt \tag{1}$$

$$P(t) = \left(\frac{\gamma_2 c}{2L_e} \right) h\nu\phi_p \tag{2}$$

$$\phi_p = V_a N_{th} \left[\frac{N_p}{N_{th}} - \ln \left(\frac{N_p}{N_{th}} \right) - 1 \right] \tag{3}$$

여기서 P 는 시간 t 에 따른 출력 파워, γ_2 는 출력 거울의 반

사율을 고려한 로그 손실값, L_c 는 매질의 굴절률이 고려된 공진기 유효 길이, c 는 광속, h 는 플랑크 상수, ν 는 레이저 발진 주파수, ϕ_p 는 광자수, V_a 는 매질 내에서의 모드 부피이며, N_p 와 N_{th} 는 반전분포와 문턱값으로 이는 각각 Q-스위칭 발진 실험에서 얻은 여기 에너지 E_p 와 문턱값 E_{th} 로 나타낼 수 있다. 계산에 사용된 파라미터와 실험에서 사용된 소자들의 제특성을 표 1에 정리하였다. Q-스위칭된 출력 에너지의 계산값은 측정값과 유사하게 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었다. Q-스위칭된 세라믹 Nd:YAG 레이저의 펄스폭은 광자수와 반전분포수의 시간변화율을 나타내는 식 (4)와 식 (5)에 Runge-Kutta 법을 적용하여 계산하였다.^[20,21]

$$\frac{d\phi}{dT} = \phi \left(\frac{N_p}{N_{th}} - 1 \right) \quad (4)$$

$$\frac{dN}{dT} = -2\phi \frac{N_p}{N_{th}} \quad (5)$$

여기서 T 는 공진기의 광자 수명을 규격화한 시간이다. 펄스폭 계산값은 시간에 대한 광자수 결과로부터 반치폭을 계산하여 얻었다. 그 결과 실험값과 이론값이 유사한 경향을 나타내면서 지수 함수적으로 감소하는 것을 볼 수 있다. 펄스폭은 여기 에너지를 20 mJ 이상 더 증가시키더라도 약 3.5 ns 정도가 될 것으로 예상된다.

그림 5는 Q-스위칭 세라믹 Nd:YAG 레이저의 펄스 파형이다. 최대 여기 에너지 17.9 mJ에서 펄스폭이 4 ns로 파형이 매우 깨끗하게 나타났다. 상용화된 Q-스위칭 Nd:YAG 레이저가 보통 8 ns의 펄스폭을 갖는 것을 생각한다면 세라믹 Nd:YAG 레이저의 펄스폭은 절반 정도이다. 세라믹 Nd:YAG 레이저의 펄스폭이 Nd:YAG 레이저보다 좁은 것은 세라믹 Nd:YAG 레이저의 스펙트럼 선폭이 2.2 nm로 Nd:YAG의 스펙트럼 선폭인 0.45 nm에 비해 5배 정도 넓기 때문에 상대적으로 펄스폭이 좁아진 것으로 생각된다. 이와 같은 결과는 세라믹 Nd:YAG 레이저가 Nd:YAG 레이저보다 침투 출력을 2배 이상 높일 수 있어 레이저의 응용성이 넓어질 것으로 기대하게 한다.

세라믹 Nd:YAG 레이저의 Q-스위칭 펄스 파형을 이론적으로 분석하기 위해 각각의 여기 에너지에 대해 시간에 따른 광자 수를 계산하였으며, 이를 그림 6에 나타내었다. 계산은

표 1. Q-스위칭 발진특성 계산에 사용된 파라미터

Property	Symbol	Value	Unit
출력 거울의 로그손실	γ_2	0.26	-
공진기 유효길이	L_c	128.2	mm
레이저 발진 주파수	ν	2.82×10^{14}	Hz
매질 내 모드 체적	V_a	2.11×10^{-9}	m ³
반전분포	$N_p (= E_p)$	17.9	mJ
반전분포 문턱값	$N_{th} (= E_{th})$	5.2	mJ

식 (4)와 식 (5)를 이용하였다. 여기 에너지 10.9 mJ, 13.3 mJ, 15.6 mJ 및 17.9 mJ에서의 펄스폭은 각각 6.4 ns, 4.9 ns, 4.1 ns 및 3.6 ns로 계산되었다. 계산 결과와 실험 결과인 그림 5를 비교해보면 서로 매우 유사하다. 여기 에너지 17.9 mJ에서의 측정값은 4 ns로 계산값과 비교하여 0.4 ns의 오차를 나타내었다. 이는 레이저 매질에서 발생한 열, 미세진동 및 산란 등에 의해 펄스폭이 넓어진 것으로 생각된다.

그림 7은 Q-스위칭된 세라믹 Nd:YAG 레이저의 출력 안정도이다. 실험에서 여기원의 반복 동작률은 10 Hz, 펄스당 여기 에너지는 17.9 mJ로 설정한 상태에서 약 1시간 동안 동작시키며 레이저의 펄스열을 오실로스코프로 측정하였다. 출력 안정도는 반도체레이저 여기임에도 불구하고 예상치인 $\pm 0.5\%$ 보다 큰 $\pm 1.4\%$ 로 나타났다. 이는 세라믹 Nd:YAG가 매질 내부에서 발생하는 열에 민감하게 반응하였기 때문인 것으로 생각된다.

본 논문의 실험 결과에 의하면 세라믹 Nd:YAG 레이저는

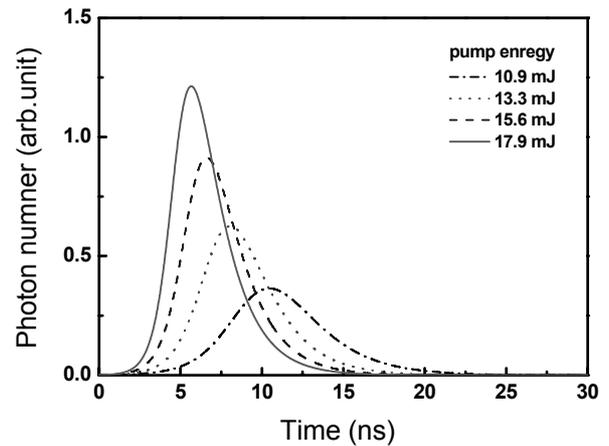


그림 6. 시간에 따른 각각의 여기 에너지에 대한 광자수 계산.

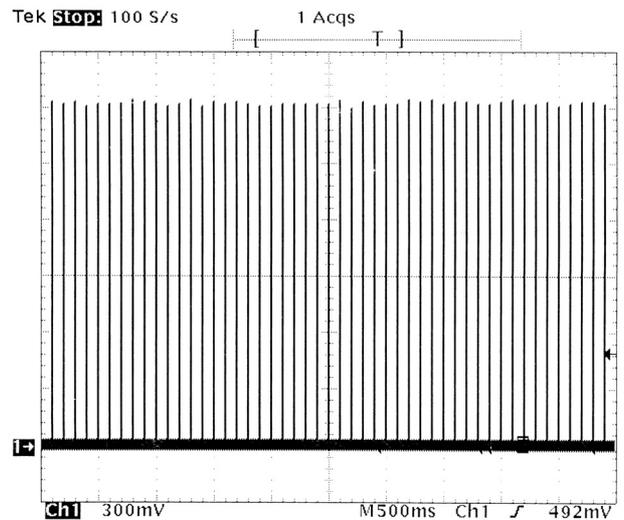


그림 7. Q-스위칭된 레이저의 출력 안정도.

Nd:YAG 레이저에 비하여 여기원의 에너지를 더 효율적으로 사용할 수 있으며, 2배 이상 높은 침투 출력을 얻을 수 있어 고강도 펄스 레이저로 응용이 가능하다고 판단된다.

IV. 결 론

광섬유 연결 반도체레이저 여기 세라믹 Nd:YAG 레이저의 Q-스위칭 출력 특성에 대하여 연구하였다. 정상발전 시 여기원의 펄스폭이 1,000 μ s, 출력 거울의 반사율이 77%일 때 입력 에너지 17.9 mJ에서 출력 에너지 7.9 mJ을 나타내었다. 이때 최대 출력 효율과 기울기 효율은 각각 44.2%와 48.6%로 나타났다. 펄스 발전에서는 연속 발전에 비해 레이저 매질에 입력되는 여기 에너지의 밀도가 열렌즈 효과를 발생시킬 만큼 높지 않아 레이저 출력이 선형적으로 증가하였다. 레이저 공진기와 Q-스위칭은 출력 거울의 반사율 77%, 여기원의 펄스폭 1,000 μ s 및 지연시간 985 μ s에서 최적화되었다. 17.9 mJ의 여기 에너지에서 0.35 mJ의 Q-스위칭된 출력 에너지와 약 4 ns의 펄스폭이 측정되어 1.9%의 출력 효율과 87.5 kW의 침투 출력을 나타내었다. 세라믹 Nd:YAG 레이저는 Nd:YAG 레이저에 비하여 여기원의 에너지를 3배 정도 더 효율적으로 사용할 수 있으며, Q-스위칭 세라믹 Nd:YAG 레이저는 Nd:YAG보다 2배 이상의 침투 출력을 나타낸 것으로 보아 우수한 고강도 펄스 레이저로 응용이 가능할 것으로 기대된다. 연속 발전 시 세라믹 Nd:YAG 레이저는 매질에서의 열영향으로 인해 당초 기대되었던 고출력 레이저로서의 응용성이 제한되는 것으로 보고되었다. 펄스 발전에서도 수백 mJ급의 고출력 영역에 이르면 매질에서의 열영향이 레이저 출력에 직접적인 영향을 줄 것으로 예상되므로 이에 대한 연구가 더 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] You Wang and Hirofumi Kan, "Optimization algorithm for the pump structure of diode side-pumped solid-state lasers," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 45, pp. 93-105, 2007.
- [2] Kunihiko Washio, "Overview and Recent Topics in Industrial Laser Applications in Japan," *Quantum Electronics and Laser Science Conference*, pp. 1, 2007.
- [3] Kathy Kincade, "Collaboration and competition breed industrial-laser success," *Laser Focus World*, vol. 38, 2002.
- [4] "Ceramic YAGs set to challenge single crystals," *Opto & Laser Europe*, 2001.
- [5] Y. Rabinovitch et al., "Transparent polycrystalline neodymium doped YAG:synthesis parameter, laser efficiency," *Optical Materials*, vol. 24, pp. 345-351, 2003.
- [6] A. Ikesue and Yan Lin Aung, "Synthesis and Performance of Advanced Ceramic Laser," *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 89, pp. 1936-1944, 2006.
- [7] A. Ikesue, T. Kinoshita, K. Kamata, and K. Yoshida, "Fabrication and Optical Properties of High-Performance Polycrystalline Nd:YAG Ceramics for Solid-State Lasers," *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 78, pp. 1033-1040, 1995.
- [8] K. Ueda, "Ytterbium-doped tunable ceramic laser," *Proc. Conf. Lasers and Electro-optics Europe*, 2005. CLEO/Europe, pp. 2, 2005.
- [9] J. Lu et al., "110 W ceramic Nd³⁺:Y₃Al₅O₁₂ laser," *Appl. Phys.*, vol. B 79, pp. 25-28, 2004.
- [10] Ichiro shoji, Yoichi sato, sunao Kurimura, Voicu Lupei, Takunori Taira, Akio Ikesue, and Kinio Yoshida, "Thermal-Birefringence-induced depolarization in Nd:YAG ceramics," *Optics Letters*, vol. 27, pp. 234-236, 2002.
- [11] 김덕래, 김영식, 김병태, "광섬유 연결 반도체레이저 여기 세라믹 Nd:YAG 레이저에서 열렌즈 효과의 보상," *한국광학회지*, 제 18권 3호, pp. 208-215, 2007.
- [12] J. Lu et al., "Optical properties and highly efficient laser oscillation of Nd:YAG ceramics," *Appl. Phys.*, vol. B 71, pp. 469-473, 2000.
- [13] J. Dong, J. Lu, A. Shirakawa, and K. Ueda, "Optimization of the laser performance in Nd³⁺:YAG ceramic microchip lasers," *Appl. Phys.*, vol. B 80, pp. 39-43, 2005.
- [14] 옥창민, 김병태, 김덕래, "광섬유 연결 반도체레이저 여기 세라믹 Nd:YAG 레이저에서 열렌즈 효과에 의한 출력특성," *한국광학회지*, 제 17권 5호, pp. 455-460, 2006.
- [15] J. Lu et al., "Neodymium doped yttrium aluminum garnet (Y₃Al₅O₁₂) nanocrystalline ceramics a new generation of solid state laser and optical materials," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 341, pp. 220-225, 2002.
- [16] Kazunori Takaichi et al., "Chromium Doped Y₃Al₅O₁₂ Ceramics-a Novel Saturable Absorber for Passively Self-Q-Switched One-Micron Solid State Lasers," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol 41, pp. L96-L98, 2002.
- [17] Takashige Omatsu, Tomihiro Isogami, Ara Minassian, and Michael J. Damzen, ">100 kHz Q-switched operation in transversely diode-pumped ceramic Nd³⁺:YAG laser in bounce geometry," *Optics Communications*, vol. 249, pp. 531-537, 2005.
- [18] Yunfeng Qi et al., "High-energy LDA side-pumped electro-optical Q-switched Nd:YAG ceramic laser," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 24, pp. 1042-1045, 2007.
- [19] Orazio Svelto, *Principles of Lasers*, (Plenum Press, New York, 1998), Chapt. 8, pp. 311-325.
- [20] Amnon Yariv, *Optical Electronics in Modern Communications*, (Oxford University Press, New York, 1997), Chapt. 6, pp. 227-235.
- [21] Peter W. Milonni and Joseph H. Eberly, *Lasers*, (John Wiley & Sons, New York, 1988), Chapt. 12, pp. 365-406.

Optimization of Q-switched Operation at a Laser-Diode Pumped Nd:YAG Ceramic Laser

Dong-Joon Shin[†] and Byung-Tai Kim

Department of Laser & Optical information Engineering, Cheongju University, Cheongju 360-764, Korea

[†]*E-mail: jiwahajajota@hanmail.net*

Duck-Lae Kim

Medical Laser and Device Research Center, Dankook University, Cheonan 330-714, Korea

(Received July 28, 2008; Revised manuscript August 20, 2008; Accepted August 20, 2008)

The output characteristics of a laser-diode pumped electrooptic Q-switched Nd:YAG ceramic laser were investigated. The output energy of a Q-switched Nd:YAG ceramic laser was optimized under an output coupler reflectivity of 77%, a laser-diode pulse width of 1,000 μ s, and a delay time of 985 μ s. The output energy of the Q-switched pulse was measured to be 0.35 mJ with a pulse width of 4 ns under a pump energy of 17.9 mJ. The output efficiency and the peak power were 1.9% and 87.5 kW, respectively.

OCIS codes: (140.3460) Lasers; (140.3480) Lasers, diode-pumped; (140.3530) Lasers, neodymium; (140.3540) Lasers, Q-switched; (140.3580) Lasers, solid-state.