

# Output Characteristics of a Yb:YAG Laser Q-Switched by a Semiconductor Saturable Absorber and an Output Coupler Composed of a Polarizer and a Quarter-Wave Plate

Cheol Yong Ahan, Hyun Chul Kim, Han Bum Lim, and Hyun Su Kim<sup>†</sup>

*Department of Photonic Engineering, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea*

(Received January 21, 2014; Revised manuscript February 12, 2014; Accepted February 13, 2014)

We propose a Yb:YAG laser Q-switched by a semiconductor saturable absorber and a laser output coupler composed of a polarizer and a quarter-wave plate, and we investigate the output characteristics of the proposed Q-switched laser. We show that the laser power can be varied by rotation of the quarter-wave plate.

Keywords: Yb:YAG laser, Saturable absorber, Q-switching

OCIS codes: (140.3540) Lasers, Q-switched; (140.3615) Lasers, ytterbium; (140.3480) Lasers, diode-pumped

## 편광기와 1/4 파장판으로 구성된 출력경과 반도체 포화 흡수체에 의해 Q-스위칭된 Yb:YAG 레이저 출력 특성 연구

안철용 · 김현철 · 임한범 · 김현수<sup>†</sup>

조선대학교 광기술공학과

☎ 501-759 광주광역시 동구 필문대로 309번지

(2014년 1월 21일 받음, 2014년 2월 12일 수정본 받음, 2014년 2월 13일 게재 확정)

편광기와 1/4 파장판을 이용한 레이저 출력경을 적용한 반도체 포화 흡수체에 의해 Q-스위칭된 Yb:YAG 레이저를 제안하고 그 출력 특성을 조사하였다. 설치된 1/4 파장판의 회전각을 변화시킴으로써 레이저 출력을 가변시킬 수 있음을 보였다.

Keywords: Yb:YAG 레이저, 포화흡수체, Q-스위칭

OCIS codes: (140.3540) Lasers, Q-switched; (140.3615) Lasers, ytterbium; (140.3480) Lasers, diode-pumped

### I. 서 론

Yb:YAG는 가시광선영역에 펄프대역이 없고 942 nm 근방에서 단일 흡수선을 가지고 있기 때문에 가시광 영역 내에서 빛을 방출하는 플래쉬 램프에 의한 레이저 발진이 어려웠고 940 nm 파장 대로 발진하는 InGaAs 다이오드 레이저가 개발된 후 레이저 연구자들이 많은 관심을 가지게 되었다<sup>1, 2</sup>. Yb:YAG 레이저 펄스 발생은 주로 능동형 또는 수동형 Q-스위칭 기술을 이용하여 이루어진다<sup>3-5</sup>. 수동형 Q-스위칭 기술은 능동형 보다 레이저 출력 제어가 어렵지만 수동형 Q-스위칭에 의해 구현된 레이저의 펄스 폭은 능동형 의해 발생된 레이저의 펄스 폭보다 일반적으로 더 작은 값을 갖는 특징을

가지고 있다. 또한 능동형 보다 수동형 Q-스위칭 레이저의 제조비용이 현저히 낮은 장점을 가지고 있다. Yb:YAG 레이저의 수동형 Q-스위칭은 주로 Cr<sup>4+</sup>:YAG와 반도체 포화 흡수체 거울(Semiconductor Saturable Absorber Mirror : SESAM)을 사용하여 이루어진다<sup>4-7</sup>. 그 중 SESAM은 크기가 작고 흡수체와 레이저 거울이 일체형으로 되어있어 레이저 공진기 구조를 간단히 할 수 있는 장점을 가지고 있다<sup>8</sup>. 또한 반도체 제조기술이 발달함에 따라 다양한 광학 특성을 갖는 SESAM을 설계할 수 있어서 다양한 레이저 펄스를 발생시킬 수 있는 장점이 있어 최근에 많은 연구가 이루어지고 있다<sup>8</sup>. 일반적으로 수동형 Q-스위칭 레이저의 출력은 레이저 공진기 구조, 레이저 매질 특성, 포화 흡수체 특성에 관련된 매

<sup>†</sup>E-mail: [hskim21@chosun.ac.kr](mailto:hskim21@chosun.ac.kr)

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

개변수 등에 의해 영향을 받는다<sup>[1]</sup>. 공진기 구조에 관련된 공진기 길이, 출력경 투과율과 같은 매개변수는 다른 매개변수에 비해서 비교적 쉽게 조절을 할 수 있어서 Q-스위칭된 레이저 펄스 에너지를 제어하기 위해 이들 변수들을 조절할 수 있다. 그러나 단순히 유전체 거울 코팅에 의한 출력경 투과율의 조절은 다양한 종류의 많은 거울을 필요로 하기 때문에 현실적으로 다양한 종류의 거울을 사용하여 레이저 출력을 연속적으로 가변하기는 어렵다. 따라서 손쉽게 Q-스위칭된 레이저 출력을 조절하는 연구가 필요하다.

본 연구에서는 편광기와 1/4 파장판을 이용하여 레이저 출력경을 구성해서 출력경의 투과율을 손쉽게 조절할 수 있게 하고 이를 SESAM이 설치된 Yb:YAG 레이저에 최초로 적용하여 편광 및 Q-스위칭된 레이저 출력이 연속적으로 가변될 수 있도록 하였다. 제안된 출력경의 투과율을 변화시키면서 Q-스위칭된 Yb:YAG의 출력 특성을 조사하였다.

## II. 편광기와 1/4 파장판을 구성된 출력경과 반도체 포화 흡수체에 의해 Q-스위칭된 Yb:YAG 레이저

Q-스위칭 펄스 레이저의 출력을 손쉽게 가변하기 위해 본 연구에서 제안한 편광기와  $\lambda/4$  파장판을 이용한 출력경과 SESAM으로 구성된 Yb:YAG 레이저 구조는 그림 1과 같다.

실험에 사용된 Yb:YAG의 Yb 도핑율은 5 at%이고 크기는 직경 5 mm, 두께 3.5 mm이다. 전반사경은 940 nm는 투과(>90%)하고 1030 nm에 대해서는 전반사(>99%) 하도록 설계되었다. 전반사경(M)의 곡률 반경(R)은 2000 mm을 사용하였다. 펌프용 LD는 LIMO사에서 제작된 것으로 940 nm의 중심파장으로 발진하고 최대 출력이 30 W이다. LD에 결합된 광섬유의 코어 크기는 400  $\mu\text{m}$ 이다. 펌프광의 집광용 렌즈는 두 개의 평-볼록 렌즈(L1, L2)를 이용하였다. 각 렌즈의 초점거리 35 mm, 25.4 mm이다. SESAM에서 집광효율을 높이기 위해 렌즈 L3를 이용했고 초점거리( $f$ )는 50 mm이다. 사용된 SESAM은 1030 nm 파장에서 변조 깊이가 0.5%인 것을 이용하였다. 출력경의 투과율을 연속적으로 변화하기 위해 1/4 파장판을 편광 빔 분할기(PBS)를 이용하여 출력경을 구성하였다. 1/4 파장판의 빠른 축과 PBS의 수직 편광축이 이루는 각( $\theta$ )에 따라 투과율이 결정된다. 이 때 투과율은 다음과 같이 주어진다.

$$T = (\sin 2\theta)^2 \quad (1)$$

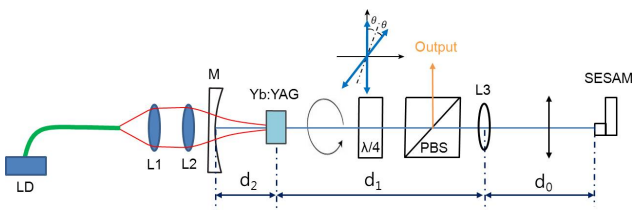


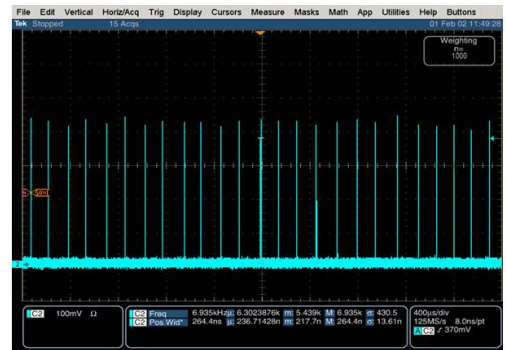
FIG. 1. Q-switched Yb:YAG laser by a semiconductor saturable absorber and a output coupler composed of a polarizer and a quarter wave plate.

식 (1)은 각  $\theta$ 가 증가함에 따라 출력경의 투과도가 증가함을 보여 준다.

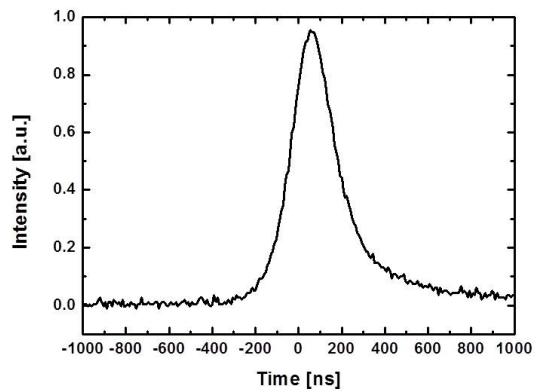
공진기 길이에 따른 Q-스위칭 펄스 출력의 안정 조건은 여러 가지 레이저 매개변수와 상호 연관되어 있기 때문에 공진기 길이( $d_0, d_1, d_2$ )를 이론적으로 구하기 어렵다<sup>[3]</sup>. 본 연구에서도 Q-스위칭 펄스가 안정적으로 발생하는 공진기 길이를 실험적으로 구하기 위해 공진기 길이를 변화시키면서 레이저 발진 실험을 하였다. 본 실험에서는 공진기의 길이  $d_0, d_1, d_2$ 을 각각 50 mm, 108 mm, 13 mm로 구성할 때 안정적인 Q-스위칭 펄스를 얻었다. 특히 반도체 포화 흡수체 거울과 렌즈(L) 사이의 거리( $d_0$ ) 변화는 Q-스위칭 펄스 출력에 매우 민감한 영향을 주었다. 그러나  $d_0$  길이를 렌즈의 초점거리( $f = 50$  mm)와 거의 일치하도록 하면 그림 2과 같은 안정적인 Q-스위칭 펄스 열을 얻을 수 있었다.

$d_0 = 50$  mm인 영역에서 공진기 안정도 및 Q-스위칭 펄스 출력 안정성 분석을 하기 위해 SESAM 위치에서 공진 모드 빔 크기를 분석해보았다. 빔의 크기 계산을 위해 광선전달 ABCD행렬을 이용하였다. 그림 3는 레이저 매질의 열 초점 길이( $f_g$ )가 변화할 때  $d_0$  변화에 대한 SESAM에서의 모드 빔이 반경을 나타낸 것이다.

그림 3에서 빔의 반경이 급격히 감소하여 영으로 가는 부분에서 불안전 공진이 시작된다. 그림 3으로 부터  $d_0$ 가 50 mm 부터 85 mm 까지의 영역에서 공진기가 안정조건에 있음을



(a)



(b)

FIG. 2. (a) Q-switched pulse train and (b) a single pulse shape at the LD power of 17.5 W and the wave plate rotation angle of 20°.

알 수 있다. 특히,  $d_0 = 50 \text{ mm}$ 인 영역에서  $f_g$ 가 변화할 때 공진 모드 빔의 크기가 크게 변화함을 알 수 있다. 이 영역에서의 공진 모드 빔 크기 변화는 그림 4에 자세히 나타내었다. 그림 4는  $d_0$ 가  $50 \text{ mm}$  일 때  $1/f_g$ 의 크기에 따른 반도체 포화 흡수체 거울 표면에서 공진 모드 빔 면적을 계산한 것이다.

그림 4에서  $1/f_g$ 의 크기에 대한 모드 빔 면적은 근사적으로 일정하게 증가함을 알 수 있다.  $f_g$ 는 펌프광 세기( $P_{pump}$ )에 반비례하기 때문에 SESAM 표면에 입사하는 공진 모드 빔의 면적은  $P_{pump}$ 에 비례한다고 할 수 있다<sup>11</sup>. 레이저 출력이 펌프광 세기에 비례하여 증가한다고 가정하면 그림 3으로부터 SESAM 표면에 입사하는 단위면적당 공진기 레이저 빔의 세기는  $f_g$ 에 무관하게 일정할 것으로 가정할 수 있다. SESAM은 입사하는 광의 단위 면적당 세기( $I_{SESAM}$ )에 대한 SESAM의 반사율 변화에 의존하여 Q-스위칭 동작 특성이 정해진다<sup>31</sup>. 따라서  $d_0$ 가  $50 \text{ mm}$ 인 영역에서는 펌프광 세기가 변해도 SESAM에 입사하는  $I_{SESAM}$ 은 크게 변화하지 않기 때문에  $P_{pump}$ 에 크게 영향을 받지 않고 안정적인 Q-스위칭 동작을 할 수 있는 것으로 판단된다.

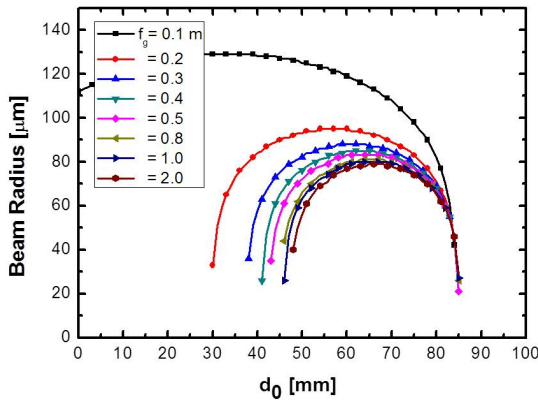


FIG. 3. Mode beam radius at the SESAM position is shown as a function of  $f_g$  and  $d_0$ .

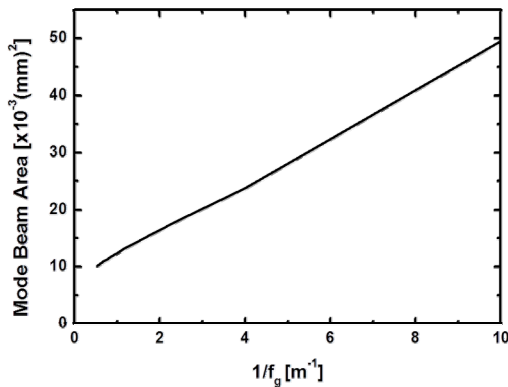


FIG. 4. At  $d_0 = 50 \text{ mm}$  the mode beam area on the SESAM is shown as a function of  $1/f_g$ .

### III. 실험 결과 및 토의

편광기와 1/4 파장판을 이용한 출력경은 식 (1)과 같은 투과율을 갖는다. 1/4 파장판의 회전 각( $\theta$ )에 따라 출력경의 투과율을 조절할 수 있기 때문에  $\theta$ 를 변화 시켜 Q-스위칭된 Yb:YAG 레이저 출력을 조절 할 수 있다. 1/4 파장판 회전 각( $\theta$ )에 따른 레이저 출력은 그림 4와 같다. 펌프광 세기( $P_{pump}$ )를 변화시키면서  $\theta$  변화에 대한 출력 특성도 조사하였다.

그림 5의 출력은 펌프광 세기( $P_{pump}$ )  $17.5 \text{ W}$ 에서 출력이 가장 높게 나타남을 보여 준다. 특히, 1/4 파장판의 회전 각도( $\theta$ )가  $22^\circ$ 일 때 최고 평균 출력을 얻었으며 약  $160 \text{ mW}$ 로 측정 되었다. 이때 식 (1)에 의해 투과율은 약 48%에 해당된다. 그림 5와 같이 출력경 투과율에 대한 출력특성은 CW 발진 고체 레이저에서 출력경의 반사율 변화에 따른 출력 변화 특성과 같은 경향을 보였다<sup>41</sup>.  $17.5 \text{ W}$ 이상으로 펌프광 세기를 증가하면 제안된 레이저 평균출력은 감소함을 알 수 있었다. 레이저 출력 감소의 원인을 분석하기 위해 ABCD 광선 전달 행렬을 이용하여 레이저 매질 내에서의 공진 모드 빔의 반경을 그림 5와 같이 구했다.

그림 6는 매질에서 발생하는 공진 모드 빔 크기가 열 렌즈

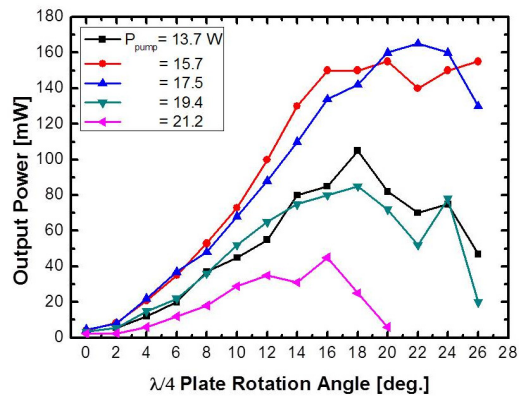


FIG. 5. Output power of the Q-switched laser is shown as a function of a rotation angle of a quarter wave plate.

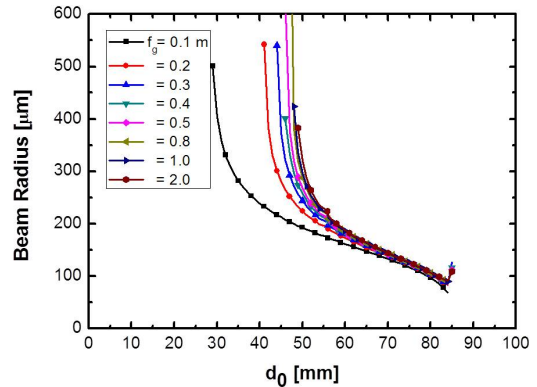


FIG. 6. Calculated mode beam radius at Yb:YAG position as a function of  $f_g$  and  $d_0$ .

초점거리  $f_g$ 에 따라 변화함을 보여준다. 매질에서 발생하는 공진 모드 빔 크기는  $d_0$ 의 길이가 50 mm에서  $f_g$ 의 초점길이가 100 mm일 때 약 190  $\mu\text{m}$ 이며,  $f_g$ 가 2000 mm일 경우 약 300  $\mu\text{m}$ 이다.  $d_0 = 50$  mm일 때 매질에서는 펌프광 세기가 증가 할수록 매질에 입사하는 공진 모드 빔의 크기는 감소한다.

그림 6에서 열 렌즈 효과에 의해 매질의 초점길이가 짧아질수록 매질에 입사하는 공진 모드 빔 모드 면적이 작아짐을 볼 수 있다. 일정 펌프 광 세기 이상에서 Q-스위칭 레이저 출력의 감소를 해석하기 위해 매질에 입사하는 펌프광의 면적에 대한 매질에 공진 모드 면적에 비율( $\eta$ )에 대해 조사하였다. 레이저 효율은  $\eta$ 에 비례 한다. CW 중 펌핑된 Yb:YAG 레이저에서 매질에 입사하는 펌프광 빔 반경은 약 320  $\mu\text{m}$ 이다. 이 값을 사용하여 열 렌즈 효과에 대한  $\eta$ 의 변화는 그림 7에 나타내었다.

그림 7에서 펌프광 세기가 낮을 때는 매질에 입사하는 펌프광의 면적과 매질에서 공진 모드 빔 면적의 크기가 비슷하여 에너지 전달 효율이 우수하지만 펌프광 세기가 증가 할수록 열 렌즈 효과에 의해 매질에서 발생하는 공진 모드 빔 면적은 펌프광 면적보다 작아지게 되어 에너지 전달 효율이 떨어짐을 알 수 있다. 레이저 출력은  $\eta P_{\text{pump}}$ 에 비례하기 때문에 어떤 값 이상의 펌프 광 세기에서는 레이저의 출력이 감소될 수 있음을 알 수 있다.

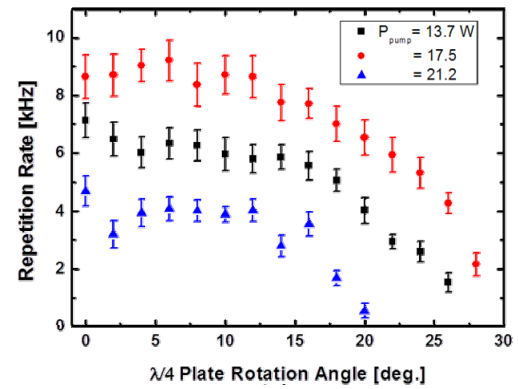
그림 8은  $\lambda/4$ 파장판 회전 각도에 따른 Q-스위칭 펄스 반복률과 펄스폭을 측정된 결과이다.

그림 8(a)에 나타난 Q-스위칭 반복률은  $1/4$  파장판 회전 각도에 따라 전반적으로 감소하는 경향을 나타냈다. 그림 8(b)의 펄스폭은  $1/4$  파장판의 각도에 따라 전반적으로 펄스 폭이 증가하는 경향이 있었다. 그림 7의 펄스 반복률과 비교하면 서로 반비례 경향이 있음을 알 수 있다. 즉 반복률이 올라갈수록 펄스 폭이 감소하였다.

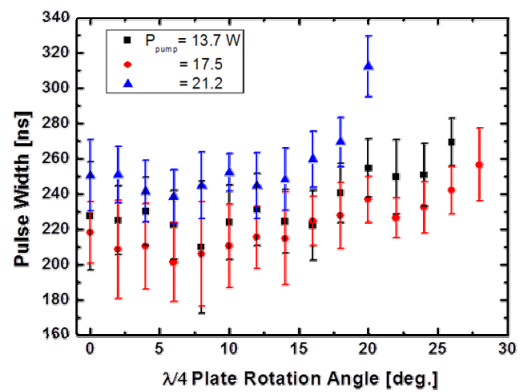
그림 5와 그림 8의 결과를 이용하면 펄스당 에너지를 구할 수 있다.  $\lambda/4$ 파장판 회전 각도에 따른 단일 레이저 펄스 에너지는 그림 9와 같다.

그림 9로부터 펌프광의 세기에 크게 관계없이 펄스 당 에

너지가 거의 같고 펄스 당 에너지는  $1/4$  파장판 회전 각도가 증가할수록 증가함을 보여주고 있다. 수동형 Q-스위칭은 공진기의 문턱에너지 수준까지 레이저 매질이 펌프 광 에너지를 흡수해서 저장하고 있다가 저장된 에너지가 문턱에너지를 넘는 순간 큰 펄스를 방출하는 매카니즘을 갖는다. 펌프 광 세기가 약해도 Yb:YAG의 형광수명시간 이내에 문턱에너지 이상의 에너지를 축적할 수 있으면 낮은 반복률의 Q-스



(a)



(b)

FIG. 8. (a) Repetition rate of the Q-switched output pulses and (b) pulse width of the laser pulses as a function of a rotation angle of a quarter wave plate.

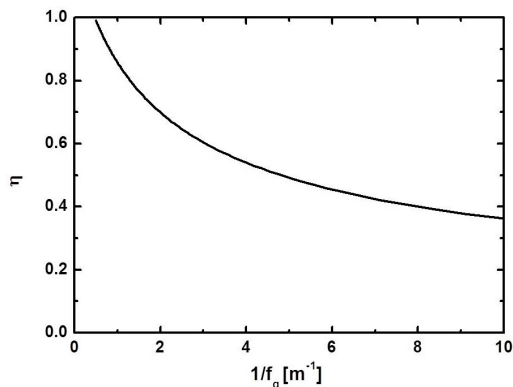


FIG. 7. Ratio ( $\eta$ ) of a mod beam area to a pump beam area at Yb:YAG position as a function of  $1/f_g$ .

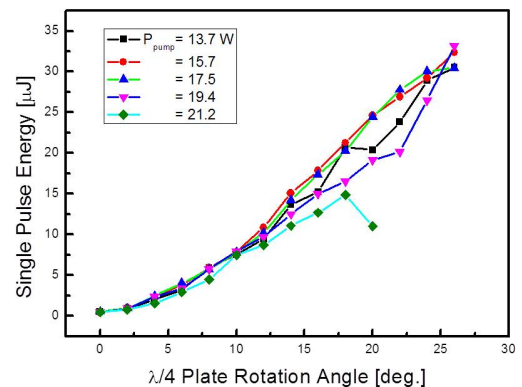


FIG. 9. Single pulse energy of the Q-switched laser pulse is shown as a function of a rotation angle of a quarter wave plate.

위칭 펄스를 발생하고 반면에 강한 펄프광이 입사하면 고 반복률의 Q-스위칭 펄스를 발생한다. 이때 펄프광 세기에 의해 공진기 조건이 바뀌지 않는다면 발생된 Q-스위칭 펄스 에너지는 펄프광 세기에 무관하고 문턱에너지 값에 의존한다. 레이저 발진 문턱에너지는 출력경의 투과율과 함께 증가하기 때문에 그림 9과 같이 1/4파장판 회전 각이 증가함에 따라 레이저 펄스 에너지가 연속적으로 증가하는 특성을 보였다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 편광기와 1/4 파장판 이용한 레이저 출력경을 적용한 반도체 포화 흡수체에 의해 Q-스위칭된 Yb:YAG 레이저를 제안하고 그 출력 특성을 조사하였다. 제안된 레이저는  $\lambda/4$ 파장판을 이용하여 출력경의 투과율을 조절하였고 출력경의 투과율 변화에 따라 Q-스위칭된 레이저 출력이 연속적으로 변화하였다. 출력경을 구성하는 1/4 파장판의 일정 회전 각 범위 내에서 회전 각 증가에 따라 평균 레이저 광 세기와 펄스 에너지는 연속적으로 증가하는 특성을 보였다. 편광된 레이저 출력은 펄프광이 17.5 W 일 때 최대 출력 165 mW을 이었으며 이때 Q-스위칭 펄스의 반복율은 2.9 kHz, 펄스 폭은 약 250 ns이었다.

#### 감사의 글

이 논문은 2013년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었습니다.

#### References

1. W. Koechner and M. Bass, *Solid-State Lasers* (Springer-Verlag, New York, USA, 2003), Chapter 7.
2. A. Giesen, H. Hügel, A. Voss, K. Wittig, U. Brauch, and H. Opower, "Scalable concept for diode-pumped high-power solid-state lasers," *Appl. Phys. B* **58**, 365-372 (1994).
3. T. Y. Fan, S. Klunk, and G. Henein, "Diode-pumped Q-switched Yb:YAG laser," *Opt. Lett.* **18**, 423-425 (1993).
4. J. Dong, A. Shirakawa, and K.-i. Ueda, "Sub-nanosecond passively Q-switched Yb:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG sandwiched microchip laser," *Appl. Phys. B* **85**, 513-518 (2006).
5. G. J. Spühler, R. Paschotta, M. P. Kullberg, M. Graf, M. Moser, E. Mix, G. Huber, C. Harder, and U. Keller, "A passively Q-switched Yb:YAG microchip laser," *Appl. Phys. B* **72**, 285-287 (2001).
6. D. Shen, D. Tang, and J. Kong, "Passively Q-switched Yb:YAG laser with a GaAs output coupler," *Opt. Commun.* **211**, 271-275 (2002).
7. J. Dong, P. Deng, Y. Liu, Y. Zhang, J. Xu, W. Chen, and X. Xie, "Passively Q-switched Yb:YAG laser with Cr<sup>4+</sup>:YAG as the saturable absorber," *Appl. Opt.* **40**, 4303-4307 (2001).
8. U. Keller, K. J. Weingarten, F. X. Kartner, D. Kopf, B. Braun, I. D. Jung, R. Fluck, C. Honninger, N. Matuschek, and J. Aus der Au, "Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAM's) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers," *IEEE J. Quantum Electron.* **2**, 435-453 (1996).