

## 포화흡수체 Nd:LSB를 이용한 1.3 $\mu$ m Q-스위칭 Nd:YAG 레이저

지명훈 · 이재명 · 오세용 · 이영우

목원대학교, (주)맥스엔지니어링

The Q-switched 1.3 $\mu$ m Nd:YAG laser using saturable absorber Nd:LSB

Myung-hoon Ji · Jae-myung Lee · Se-yong Oh · Young-woo Lee

Monwon University, Max Engineering LTD.

E-mail : ywlee@mokwon.ac.kr

### 요 약

본 논문에서는 Nd:LSB가 Q-스위칭의 포화흡수체로서 가능한지를 보였으며 포화흡수체를 이용한 수동형 Q-스위칭 Nd:YAG 레이저에서 최적화된 출력 거울의 반사율, 피크 파워, 출력 에너지, 펄스 폭, 출력 효율을 분석하였다. 포화흡수체 Nd:LSB를 이용한 수동형 Q-스위칭 Nd:YAG 레이저 시뮬레이션 출력 특성은 출력 거울의 반사율이 98%, 공진기 길이 30cm일 때 출력 30MW, 펄스폭 6.23ps를 얻을 수 있었다. 손실이 각각 2.2%, 2.1%, 1.5%일 때 출력 에너지는 각각 143, 200, 209  $\mu$ J을 얻었고 효율은 27%이었다.

### ABSTRACT

In this paper, it's shown that the saturable absorber Nd:LSB has a capability as a saturable absorber in Q-switching system. In the passively Q-switched 1.3 $\mu$ m Nd:YAG laser with saturable absorber, we theoretically investigated the optimized output mirror, peak power, output power, pulse width and output efficiency. The passively Q-switched Nd:YAG laser with saturable absorber Nd:LSB gives peak power of 30MW and pulse width of 6.23ps at 30cm resonator length and output mirror reflectivity 98%. Consequently the output energies are 143, 200 and 209  $\mu$ J at loss of 2.2%, 2.1% and 1.5%, respectively.

기 내부에서 두 파장 이상을 동시에 발진함으로써 보다 경제적이고 조작이 쉬운 레이저를 만들 수도 있다. 또한 비선형 결정을 이용 주파수 변환을 하여 보다 많은 응용분야를 넓히고 있다[3].

수동형 Q-스위칭 레이저는 적절한 여기원, 레이저 매질, 포화흡수체, 공진기 거울을 선택함으로써 최대 출력과 효율을 얻을 수 있다. Q-스위칭에 사용되는 포화흡수체의 조건은 이득매질의 유도방출 단면적보다 큰 흡수 단면적을 갖고 완화 시간이 최소한 공진기 왕복 시간보다는 짧아야 하는 조건을 가지고 있다. 이러한 조건을 만족하는 포화흡수체를 사용하여 Q-스위칭하였을 때 포화흡수체, 공진기, 거울의 반사율, 레이저 매질 등을 최적화함으로써 최대 출력과 효율을 얻을 수 있다.

포화흡수체 Nd:LSB는 Nd:YAG(0.8nm)의 4배나 되는 넓은 FMHM 흡수 대역을 가지고 있으며 1300nm 파장에서 Nd:YAG레이저의 유도 방출 단면적이  $0.5 \times 10^{-19} \text{cm}^2$  일 때 Nd:LSB의 흡수 단면적이  $1.3 \times 10^{-19} \text{cm}^2$  이므로 1310nm 파장에서 Nd:YAG

레이저의 Q-스위칭이 가능하다.

본 논문에서는 소신호 이득과 광학적 손실의 비를 나타내는 단일 비방향성 변수  $z = 2g_0l/L = \ln(g_0^2/L)$ 와  $\alpha = \gamma_s \sigma_s / \gamma \sigma$ 를 사용하였다. 여기서  $2g_0l$ 는 불포화 소신호 이득,  $L$ 은 공진기 왕복 손실,  $l$ 은 매질의 길이,  $g_0$ 는 불포화 소신호 이득,  $\gamma$ 와  $\gamma_s$ 는 레이저 매질과 흡수체의 밀도반전 감쇠요소,  $\sigma$ 와  $\sigma_s$ 는 레이저 매질의 유도 방출 단면적과 흡수체의 흡수 단면적이다[5].  $\alpha$ 는 수동형 Q-스위칭에서 사용할 레이저 매질에서 포화 에너지 강도와 흡수체에서의 포화 에너지 강도의 비를 나타낸다. 위 식들을 바탕으로 신소재결정 Nd:LSB가 수동형 Q-스위칭 소자로 가능한지를 이론적으로 연구했으며 포화흡수체 Nd:LSB를 이용한 1310nm 파장에서 Q-스위칭된 Nd:YAG 레이저의 최적화된 출력 특성을 이론적으로 해석하였다.

다[5].  $\alpha$ 는 수동형 Q-스위칭에서 사용할 레이저 매질에서 포화 에너지 강도와 흡수체에서의 포화 에너지 강도의 비를 나타낸다. 위 식들을 바탕으로 신소재결정 Nd:LSB가 수동형 Q-스위칭 소자로 가능한지를 이론적으로 연구했으며 포화흡수체 Nd:LSB를 이용한 1310nm 파장에서 Q-스위칭된 Nd:YAG 레이저의 최적화된 출력 특성을 이론적으로 해석하였다.

## II. 포화흡수체를 이용한 수동형 Q-스위칭 Nd:YAG 레이저

### 1. 1.3 $\mu$ m 파장 Nd:YAG 결정 및 레이저의 분광학적 특성

1964년 처음으로 Nd:YAG 레이저가 소개된 후 Nd:YAG 레이저는 일반적으로 1.06 $\mu$ m 파장에서 발진하는 것을 사용했고, 1.3 $\mu$ m 파장에서 발진하는 것은 잘 알려져 있지 않았다. 1.3 $\mu$ m 파장 Nd:YAG 레이저는 다른 Nd 계열의 레이저 매질보다 1.3 $\mu$ m 파장대에서 잘 동작한다.

표 1. 1.3 $\mu$ m 파장 Nd:YAG 레이저 매질의 특성

특 성	단 위	특 성 값
Wavelength	$\mu$ m	1.3414
Output energy	W	30.0
Total efficiency	%	0.43
Atomic % Nd		1.0
Nd atoms / cm <sup>3</sup>		$1.38 \times 10^{20}$
Stimulated emission cross section	cm <sup>2</sup>	$3.3 \times 10^{-19}$
Relaxation time ( <sup>4</sup> I <sub>13/2</sub> → <sup>4</sup> I <sub>9/2</sub> )	ns	30
Radiative lifetime ( <sup>4</sup> I <sub>3/2</sub> → <sup>4</sup> I <sub>13/2</sub> )	$\mu$ s	550
Spontaneous fluorescence lifetime	$\mu$ s	230
Photon energy	J	$1.86 \times 10^{-19}$
Index of refraction		1.82(at 1.0 $\mu$ m)
Scatter loss	cm <sup>-1</sup>	0.002

Nd:YAG(Neodymium-doped Yttrium Aluminum Garnet) 레이저는 YAG (Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>) 결정에 Nd<sup>3+</sup> 이온을 첨가하여 YAG 결정의 Y<sup>3+</sup> 일부와 Nd<sup>3+</sup>가 자리바꿈을 하여 안정된 Nd:YAG 레이저 매질이 된다. YAG는 가시광에서 적외광 영역까지 투명하며, 광학적으로 등방이다. 또한 열전도도가 높아서 열에 안정적이다.

표 1은 1.3 $\mu$ m 파장대의 Nd:YAG 분광학적 특성

을 나타낸 것이다. 일반적인 Nd<sup>3+</sup> 도핑 농도는 1.0 at.%이며 유도 방출 단면적은 1.3 $\mu$ m에서  $3.3 \times 10^{-19}$  cm<sup>2</sup>이다.

### 2. 포화흡수체 Nd:LSB의 특성

Nd:LSB(La<sub>1-x</sub>Nd<sub>x</sub>(Sc<sub>1-y</sub>Cry)<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub>)는 LSB(Lanthan - Scandium - Borat)에 희토류 이온 Nd<sup>3+</sup>을 도핑한 것으로 농도를  $5 \times 10^{21}$  cm<sup>-3</sup>까지 할 수 있다.

표 2은 Nd:LSB의 특성을 보여주고 있다. Nd:LSB는 Nd:YAG(0.8nm)의 4배나 되는 넓은 FWHM 흡수 대역을 가지고 있다[8]. 표에서 보여지듯이 흡수 길이는 110 $\mu$ m, 이득 폭은 4nm, 상준위 수명은 87 $\mu$ s, 이득 단면적은  $1.3 \times 10^{-19}$  cm<sup>2</sup>이다. 형광 수명을 70 $\mu$ s까지 유지 할 수 있다.  $\lambda = 1318$ nm의 값은 LSB에 도핑된 Nd<sup>3+</sup> 이온이 갖는 에너지 준위중 <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>의 준위에서 <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub>의 X<sub>1</sub>준위로의 천이에서 생성되는 광자가 갖는 파장이다. Nd:YAG 레이저의 바닥상태는 <sup>4</sup>I<sub>9/2</sub>준위인데 여기밴드로 여기를 하게 되면 이 원자들은 급속이 <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>준위로 천이 하게 된다. 여기된 원자는 유도 방출에 의해서 <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub>의 X<sub>1</sub>로 천이 하면서 1318nm의 파장에서 발진하게 된다.

레이저 매질로서의 출력 특성은 809nm의 LD로 여기 했을 때 1063nm에서 경사 효율이 70%와 0.74W 출력을 실험으로 얻은 바 있다[8].

표 2. 포화흡수체 Nd:LSB 매질의 특성

특 성	단 위	특 성 값
Absorption length	$\mu$ m	110(D=25%)
Absorption bandwidth	nm	3
Gain bandwidth	nm	4
Upper-state lifetime	$\mu$ s	87(D=25%)
Doping(D)	%	≤100
Stimulated emission cross section	cm <sup>2</sup>	$2.5 \times 10^{-19}$ (D=50%)
Thermal conductivity (300K)	W/(cm K)	0.028
Slope eff.	%	68(D=50%)
Spontaneous fluorescence lifetime	$\mu$ s	118
Transmission range	$\mu$ m	0.2~0.3
Absorption coeff.	cm <sup>-1</sup>	36

### III. 1.3 $\mu$ m 파장 수동형 Q-스위칭 Nd:YAG 레이저의 최적화

1. 포화흡수체 Nd:LSB를 이용한 1.3 $\mu$ m 파장대 Q-스위칭된 Nd:YAG 레이저의 최적화 및 출력 특성

그림 1에서 피크 출력은 출력 에너지와 펄스폭의 관계  $P = E_{out}/t_p$ 에서 구했다. 그림에서 볼 수 있듯이 피크 출력은 레이저 매질의 유도 방출 단면적과 흡수체의 비  $\alpha$  값이 증가할수록 감소하는 것을 볼 수 있다. 포화흡수체 Nd:LSB를 사용하고 Nd:YAG 매질은 직경 3mm  $\times$  길이 10mm, 유도 방출 단면적은  $3.3 \times 10^{-19} \text{cm}^2$ , 공진기 길이를 30cm로 하였을 경우  $\alpha$ 의 값이 4이므로 최대 출력은 30MW를 나타낸다.

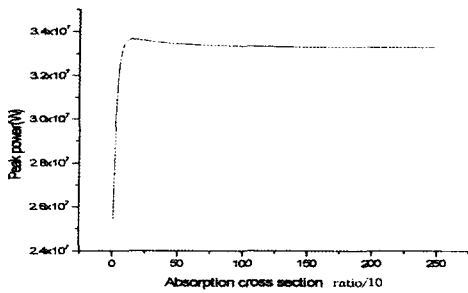


그림 1. 흡수 단면적비의 변화에 따른 피크 파워의 변화

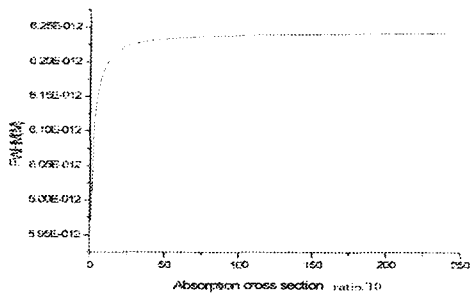


그림 2. 흡수 단면적비의 변화에 따른 펄스폭의 변화

그림 2은 문턱치 밀도반전량을  $1 \times 10^{25} \text{m}^{-3}$ , 초기 밀도반전량과 최종 밀도반전량의 비를 1.031,

감쇠 요소  $\gamma$ 와  $\gamma_s$ 의 비를 8.571로 가정했을 경우 흡수체의 단면적의 변화에 따른 펄스폭 변화를 보여 주고 있다.

레이저 매질 Nd:YAG와 흡수체 Nd:LSB를 사용할 경우, 즉  $\alpha$ 가 4일때 6.23ps의 펄스폭을 갖는 것을 보여주고 있다.

그림3 은 공진기 길이의 변화에 따른 펄스폭의 변화를 나타내고 있다. 공진기 길이가 30cm 일 때 6.23ps의 펄스폭을 갖는다.

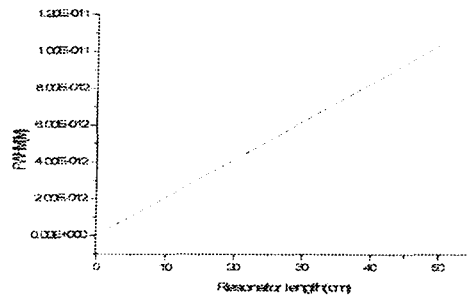


그림 3. 공진기 길이의 변화에 따른 펄스폭의 변화

### V. 결 론

본 논문에서는 포화흡수체 Nd:LSB가 포화흡수체로서 가능한지를 보였으며 포화흡수체를 이용한 수동형 Q-스위칭 Nd:YAG 레이저에서 최적화된 출력 거울의 반사율, 피크 파워, 출력 에너지, 펄스폭, 출력 효율을 수치적으로 분석하였다. 수치모델은 포화흡수체의 흡수 단면적, 출력 거울의 반사율 변화, 공진기 길이에 따른 출력 특성을 알 수 있도록 구성하였다. Nd:LSB를 이용한 1.3 $\mu$ m의 파장대의 수동형 Q-스위칭 Nd:YAG 레이저의 특성을 알 수 있었으며 다른 Q-스위칭용 포화흡수체보다 넓은 천이 영역을 가지고 있는 포화흡수체 Nd:LSB가 Q-스위칭 소자로서 우수한 성능을 갖고 있음을 보였다.

포화흡수체 Nd:LSB를 이용한 Q-스위칭 Nd:YAG 레이저에서 공진기 거울의 반사율 98%, 공진기 길이 30cm로 하였을 경우 출력 30MW, 펄스폭 6.23ps를 얻을 수 있었으며 포화흡수체의 흡수 단면적은 출력 거울의 반사율에 영향을 거의 미치지 않음을 알 수 있었다. 출력 에너지는 손실이

각각 2.2%, 2.1%, 1.5%일 때 143, 200, 209  $\mu$ J를 얻었고 효율은 27%이었다.

#### 참고문헌

- [1] W. Chudyk, K. Pohlig, L. Wolf, R. Fordiani, "Field determination of ground water contamination using laser fluorescence and fiber optics", SPIE, Vol. 1197, 1983
- [2] W. Schade, J. Bublitz, "On-site laser probe for the detection of petroleum products in water and soil", Environ. Science. Technol., Vol. 30, pp. 1451, 1996
- [3] Roman Smucler and Ladislav Horak, "Invasive leg veins Treatment with 1064/1319 Nd:YAG laser/Combination with dye laser treatment", SPIE, Vol.3590, 1999
- [4] S. Sin<sup>3</sup>, R.G. Smith, and L.G. Van Uitert, "Wagner and B.A. Lengyel, "Stimulated-emission cross section and fluorescent quantum efficiency of Nd<sup>3+</sup> in yttrium aluminum garnet at room temperature", Physical Review B, Vol. 10 No. 6, 2566, 1974
- [5] J. J. Degnan, "Theory of the optimally coupled Q-switched laser", IEEE J. Quantum Electron., Vol. 25, pp. 214-220, 1989
- [6] R. Courant and D. Hilbert, Methods of Mathematical Physics, Vol. I. New York, Interscience, 1953, ch. 4
- [7] J. J. Degnan, "Optimization of passively Q-switched lasers", IEEE J. Quantum Electronics, Vol. 31, pp. 1890-1901, 1995
- [8] B. Braun and U. Keller et al., "Passively Q-switched 180ps Nd:LaSc<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> microchip laser", Opt. Letter, Vol. 21, pp. 405-407, 1996