

Recent Progress in
1 TW YLF-phosphate Glass Laser System Development
(National Project, 1988-1991)
—Passive Mode-Locking of Nd:YAG laser
with Saturable Absorber*

Seung Joon Ahn, Jung Hwan Lee, and Sang Soo Lee
Department of Physics
Korea Advanced Institute of Science and Technology

Sun Ho Kim
Applied Optics Laboratory
Korea Advanced Institute of Science and Technology

Passive mode-locking of a pulsed Nd:YAG laser is achieved with saturable absorbers, BDN dye in iodoethane solvent and Kodak Eastman # 26 dye in 1,2-dichloroethane solvent, and its optimum conditions are investigated. The thickness of saturable absorbers employed in the laser mode-locking is 0.16~0.50 mm. The PBR (peak-to-background ratio) measured in the oscilloscope is 79.8 % in Kodak Eastman # 26 dye at the neighbourhood of the peak power, whereas the passive mode-locking with BDN dye gives PBR of 67.7 %. BDN and Kodak Eastman # 26 dyes are superior in photostability over Kodak Eastman # 9860 and # 9740 dyes which were used previously in passive mode-locking. From the PBR curve, we find that Kodak Eastman # 26 dye is more effective than BDN dye in passive mode-locking. The spacing between the adjacent pulses of the pulse train, which depends on the laser cavity length, is measured and is found to be 7 nsec for the cavity length of 100 cm.

* One of the researches for the national project supported by Ministry of Science and Technology.

1. 시 론

레이저의 출력을 높이거나 극초단의 짧은 펄스를 얻기 위해서는 여러가지 방법이 있는데 가장 널리 이용되는 방법이 레이저 모드록킹이다. 본 실험에서는 BDN/iodoethane 용액과 Kodak Eastman # 26/ 1,2-dichloroethane 용액을 포화흡수체로 사용하여 Nd:YAG 레이저의 모드록킹된 펄스 열(train)을 얻어 그 특성을 조사, 분석하였으며 포화흡수체의 불포화 투과율과 수동형 모드록킹의 최적 조건관계를 $PBR^{(1)}$ (peak-to-background ratio) 곡선을 그려 비교하였다. 그리고 본 원(KAIST)에서 개발중인 1TW 고출력 레이저용의 발진기 개일에 대해 소개하였다.

2. 실험 및 실험방법

본 실험에서 사용된 포화흡수체는 용매 iodoethane에 BDN 색소를 넣은 용액과 용매 1,2-dichloroethane에 Kodak Eastman # 26 색소를 넣은 용액을 사용하였다.

1) 포화흡수체의 화학적 성질

BDN은 bis-(4-dimethylaminodithiobenzil)-nickel⁽²⁾의 약자이다. 원래 BDN 색소는 Nd:YAG 혹은 Nd:glass 레이저의 Q-switching에 많이 사용되는 색소인데, 용매로 iodoethane을 사용하면 회복시간이 110 ps 까지 짧아져, 보통 수동형 모드록킹에 사용되는 Kodak Eastman # 9860 색소에 비하면 회복시간이 길지만 광화학적으로 대단히 안정되어 모드록킹용 포화흡수체로 사용 할 수 있다. BDN의 분자 구조식은 Fig. 1(a)와 같으며 분자량은 629.55 이고 molar extinction coefficient는 2.5×10^4 (l/mol.cm)이다. Kodak Eastman # 26 색소는 Kodak사의 # 26 색소에 대한 상업명이다. 원래의 화학적인 이름은 (4 - (7-(2-phenyl-4-H-I-benzothiopyran-4-ylidene)-4-chloro-3,5-trimethylene-1,3,5-heptatrienyl) - 2-phenyl-1-benzothiopyrylium perchlorate)⁽³⁾이며 분자 구조식은 Fig. 2(b)이다.

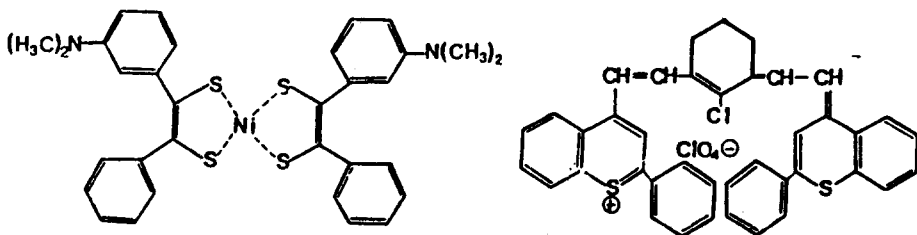


Fig. 1 Chemical structure of BDN dye (a), and Kodak Eastman # 26 dye (b).

Kodak Eastman # 26 색소는 광화학적으로 대단히 안정하며 용매 1,2-dichloroethane에서 22 ps 의 회복시간을 가진다. 그리고 분자량은 709.7 이며 molar extinction coefficient 는 파장이 1080 nm 에서 1.5×10^5 ($\ell/\text{mol}\cdot\text{cm}$) 이다.

2) 포화흡수체의 농도결정

포화흡수체의 농도결정은 수동형 모드록킹에서 대단히 중요하다. 포화흡수체의 투과율, T는 다음과 같이 주어진다.

$$T = 10^{-N \epsilon \ell} \quad (4)$$

N : mol 농도

ϵ : molar extinction coefficient

ℓ : 포화흡수체의 두께

(1) 식의 mol 농도, N 은

$$W = N \cdot V \cdot M \quad (2)$$

V : volume

M : 분자량

W : 색소의 무게

으로부터 구 할 수 있다. 본 실험에서 사용한 포화흡수체의 두께는 0.16~0.5 mm 이며 이들 포화흡수체의 불포화 투과율은 65~80 %를 유지 하였으며 Carry-17 spectrophotometer 로 파장이 1000 nm 부터 1100 nm 까지 범위에 대해 측정하였다.

3) 실험장치

Fig. 2는 수동형 모드록킹 펄스 일을 얻기위한 실험 장치도이다. 모드록킹된 펄스 일을 측정 하기위해 PIN 광 다이오드와 저장 오실로스코프를 사용하였다.

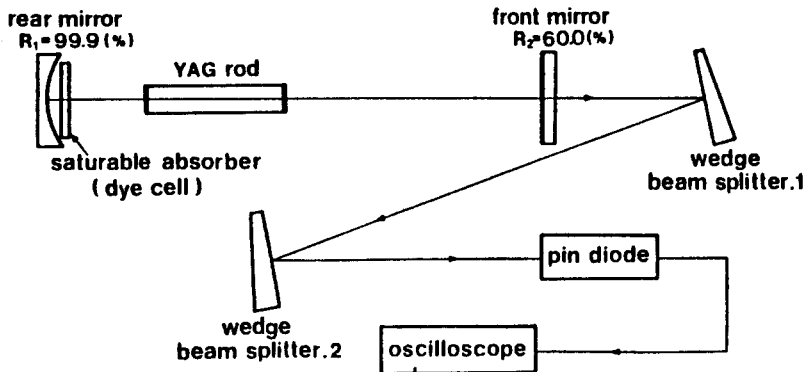


Fig. 2 Schematic of the experimental setup.

4) 본 원(KAIST) 에서 개발중인 1 TW용 Nd:YLF 발진기

최근 Fig. 3 과 같은 레이저 개일이 재현에 대한 안정성이 높아서 고출력용 레이저에 많이 사용되고 있다. 이 개일은 펄스 selector와 RGA (regenerative amplifier) 를 사용, cavity dumping 방식을 채택하여 peak 펄스를 선택해 낸다. 이와 같은 레이저 개일은 안정성은 높으나 가격이 비싼 결점이 있다. 본 실험의 펄스형 레이저의 수동형 모드록킹은 증폭을 거치지 않고도 상당히 큰 출력을 얻을 수 있으며 포화흡수체 만들 사용하기 때문에 모드록킹된 펄스를 얻는데 어려움이 있다. 단지 재현에 대한 안정성만 높힐 수 있다면 고출력 레이저에 수동형 모드록킹을 적용해도 좋은 결과를 얻을 수 있을 것이다.

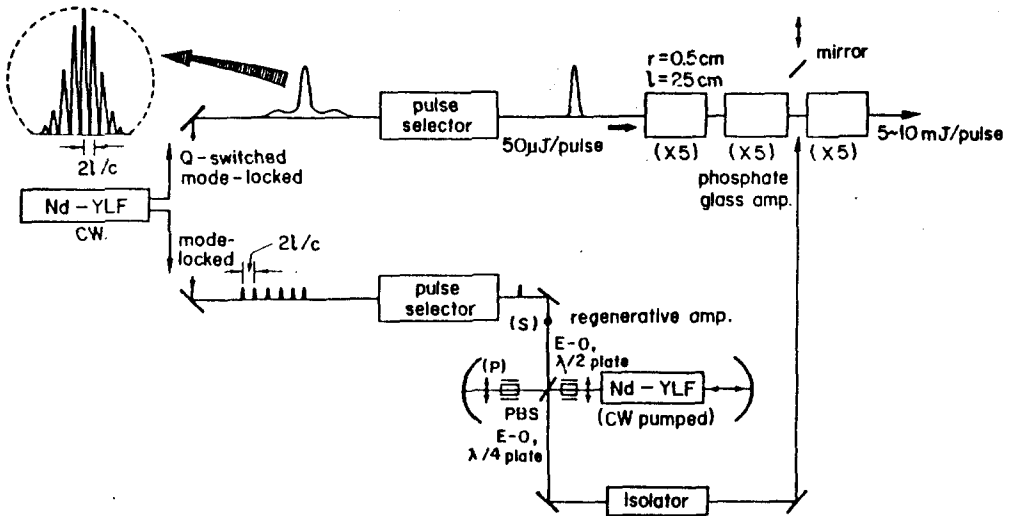


Fig. 3 Osillator part for 1 TW VLF-phosphate glass laser system.

3. 실험결과 및 분석

Fig. 4는 포화흡수체 (BDN을 사용했을 때) 의 투과율이 71.2% , 72.4% , 73.7% , 76.3% 일 때, Fig. 5는 포화흡수체 (Kodak Eastman # 26 을 사용했을 때) 의 투과율이 70.3% , 72.5% , 73.6% , 77.1% 일 때 PIN 광 다이오드와 저장 오실로스코프로 측정 한 모드록킹된 펄스 열이다. (50 nsec/div. , cavity length = 100 cm) Fig. 4 와 Fig. 5에서 보는 바와 같이 오실로스코프의 한 눈금안에 7 개의 모드록킹된 펄스가 있으므로 펄스간 간격은 7 nsec 가 되어 공진기의 왕복시간과 잘 일치함을 알 수 있다.

BDN 색소나 Kodak Eastman # 26 색소를 사용하여 얻은 모드록킹 펄스를 살펴 보면약간의 배경(background)이 남아 있다. 모드록킹의 완전한 정도를 수치적으로 해석하기 위하여 PBR개념을 도입하여

$$PBR = \frac{I_p - I_b}{I_p} \quad (3)$$

I_p : peak 펄스의 강도

I_b : background 의 강도

라고 정의 하였다. (3) 식을 이용하여 실험에서 얻은 결과에 대해 PBR 을 계산하고 BDN 색소와 Kodak Eastman # 26 색소에 대한 PBR 곡선(PBR 대 $(-\log T)/\epsilon$ 의 곡선)을 그려 모드록킹된 펄스를 비교 분석하였다. (Fig. 6 참조) PBR 곡선이 위쪽에 위치 할 수록 완벽한 모드록킹이 일어났다는 것을 의미하며, PBR 곡선의 기울기 변화가 완만 할 수록 모드록킹이 일어날 수 있는 적정농도의 범위가 넓다는 것을 의미한다. Fig. 6 에서 보는바와 같이 Kodak Eastman # 26 색소는 BDN 색소보다 PBR 이 크고 곡선도 완만 하여 모드록킹용 포화흡수체로서 더 적합하다는 것을 알 수 있다.

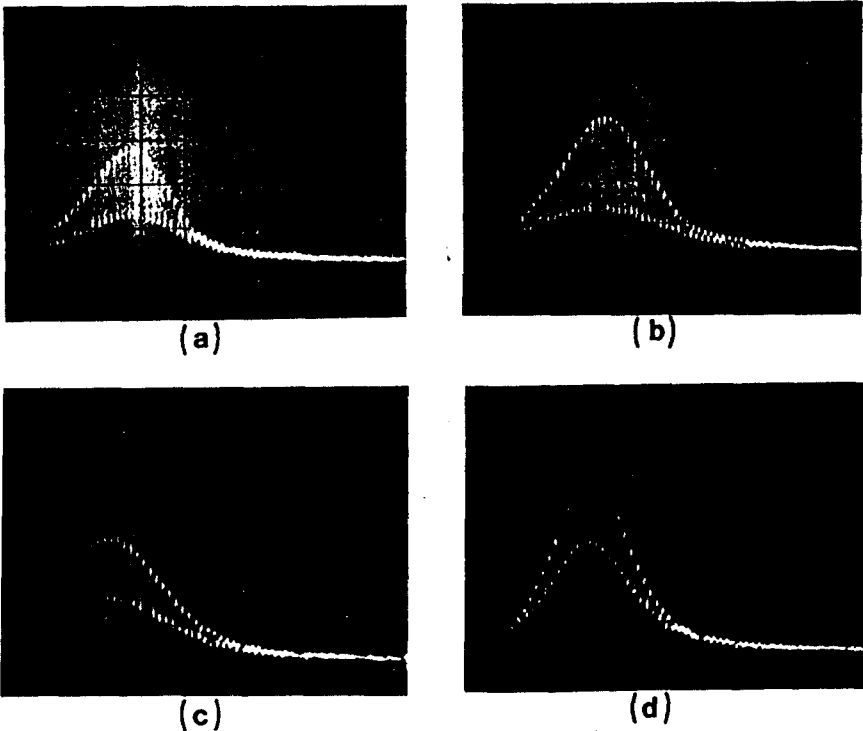


Fig. 4 Oscilloscope trace of a train of passively mode-locked Nd:YAG laser using BDN dye. (50nsec/div., cavity length = 100 cm) (a) $T=71.2\%$, (b) $T=72.4\%$, (c) $T=73.7\%$, (d) $T=76.3\%$

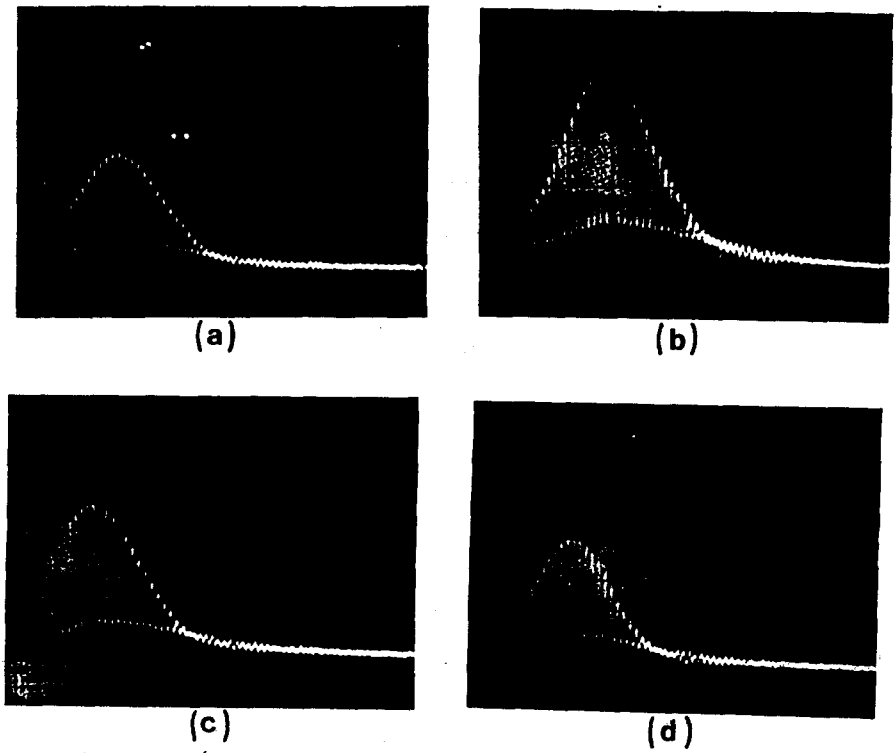


Fig. 5 Oscilloscope trace of a train of passively mode-locked Nd:YAG laser using #26 dye. (50nsec/div., cavity length = 100 cm) (a) $T=70.3\%$, (b) $T=72.5\%$, (c) $T=73.6\%$, (d) $T=77.1\%$

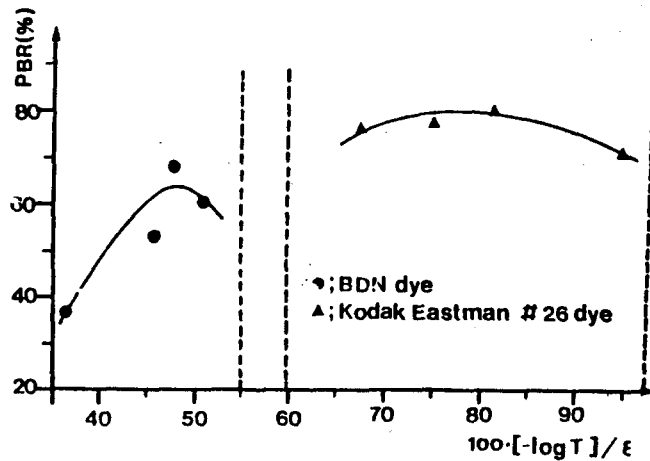


Fig. 6 The PBR of passively mode-locked Nd:YAG laser dependent on dye concentration and dye cell thickness.

4. 결 론

본 실험에서는 PBR 개념을 도입하여 모드 록킹의 완전한 정도를 수치적으로 해석하였으며, 모드 록킹이 잘 일어나는 저장농도의 범위를 조사하였다. BDN 색소의 경우 저장농도는 71~72 % 로서 그 폭이 좁은데, Kodak Eastman # 26 색소의 경우는 70~77 % 로서 BDN 색소에 비해 상당히 넓다. 그리고 모드 록킹된 펄스간 간격은 공진기 길이가 100 cm 일 때 7 nsec 인데, 이것은 공진기내의 왕복시간과 잘 일치하였다.

참 고 문 헌

- (1) Y.S. Kim, Ph.D. Thesis, KAIST, Seoul, (1985).
- (2) H. Al-Obaidi, R.J. Dewhurst, D. Jacoby, Opt. Comm. 14, 219 (1975).
- (3) W. Kraintzky, B. Kopinsky, W. Kaiser, Opt. Comm. 36, 149 (1981).
- (4) F.P. Schafer, Dye Laser, 2nd ed., Springer-Verlag New York Inc. (1977).