

# 플래시 램프로 펌핑한 Nd:YAG 레이저의 1.444 $\mu\text{m}$ 출력 특성

論 文  
55C-12-12

## Output Characteristics of a Flashlamp pumped Nd:YAG Lasers at 1444 nm

李熙澈\* · 金奎旭\*\* · 金東暎\*\*\* · 孔承煥\*\*\* · 金容平†  
(Hee-Chul Lee · Gyu-Ug Kim · Dong-Hyun Kim · Sung-Hwan Gong · Yong-Pyung Kim)

**Abstract** - We investigated the output characteristics of Nd:YAG lasers at wavelength of 1444 nm, which were pumped by 450 Xe-flashlamp, 700 torr Xe-flashlamp and 700 torr Kr-flashlamp. With a Xe-flashlamp of 700 torr of gas pressure, the pulse energy of 0.738 J was obtained with repetition rate of 9.16 Hz and pumping pulse width of 400 ms. In case pumping pulse width of 5 ms and repetition rate of 1 Hz, 700 torr Kr-flashlamp showed the highest pulse energy of 1.44 J.

**Key Words** : Laser, Flashlamp, Nd:YAG, 1444 nm, 이완 발진

### 1. 서 론

Nd:YAG 레이저는 Nd:YAG 결정이 갖는 효율과 열적 우수함 및 화학적 안정성으로 인하여 지난 40년 동안 많은 연구가 이루어져 왔고 많은 응용 분야에서 활용되어져 왔다. Nd:YAG 레이저는 약 30개의 레이저 천이 선을 가지고 있는데 이 천이 선에 1400 nm의 영역이 포함되어 있다.<sup>[1]</sup> 1400 nm 대역의 파장은 눈에 대한 안정성이 높고 1064 nm에 비하여 상대적으로 물에 대한 흡수도가 높아 오래 전부터 의료용 분야에서 많은 관심의 대상이었으며, lidar 및 광통신 분야 등에서도 많은 요구가 있어 왔다.<sup>[2-5]</sup>

1400 nm 대역에서의 유도 방출 단면적이 1064 nm나 1319, 1339 nm에 비하여 상대적으로 매우 작아 1400 nm 대역에서의 발진을 얻기 위해서는 유도 방출 단면적이 큰 파장들이 발진되지 않도록 공진기 설계 시 세심한 주의가 필요하다. 이러한 조건에도 불구하고 Wong<sup>[2]</sup>와 Hodgson<sup>[3]</sup> 등은 플래시 램프(flash lamp)로 펌핑하는 Nd:YAG 레이저에서 큐(Q)스위칭(Q-switching) 및 수백  $\mu\text{s}$ 의 펄스로 동작하는 1444 nm 파장의 안정한 발진 가능성과 그 효율에 대한 연구 결과를 발표하였다. 고체 레이저의 펌핑 광원으로 사용되는 플래시 램프는 Xe과 Kr 두 기체가 주로 사용 되어 지며 일반적으로 ms 단위의 짧은 펄스폭으로 펌핑하는 경우 Xe 플래시 램프를, ms 단위 이상의 펄스폭 및 연속적으로 펌핑하는 경우에는 Kr 플래시 램프가 사용된다. 이는 플래시 램프의 동

작 조건에 따라 기체의 종류가 정해지는 것이 아니라, 인가되는 전류 밀도에 따른 기체의 방출 스펙트럼 변화가 어느 것이 레이저의 흡수선에 더 적합 하는가의 여부에 따라 결정되기 때문이다.<sup>[6]</sup> 한편 1444 nm의 출력을 얻기 위하여 다이오드 레이저(diode laser, LD)로 펌핑하는 경우 여기상태의 흡수(excited-state absorption, ESA)로 인하여 유효 유도 방출 단면적이 줄어들게 된다.<sup>[4]</sup>

인간의 피부 침투 깊이에 있어 1444 nm의 파장은 2080 nm의 발진 파장을 갖는 CTH:YAG 레이저와 비슷하여 외과용에 많은 활용 분야가 있다.<sup>[5]</sup> 본 연구에서는 플래시 램프로 펌핑하여 펄스로 동작하는 Nd:YAG 레이저의 1444 nm 발진 특성을 알아보고자 플래시 램프 종류에 따른 효율을 측정하였다. 실험에 사용한 플래시 램프는 450 및, 700 torr의 Xe 플래시 램프와 700 torr의 Kr 플래시 램프이다. 반복율이 9 Hz이고 펌핑 펄스폭이 400  $\mu\text{s}$ 일때, 700 torr의 Xe 플래시 램프를 사용 하는 경우 0.738 J의 펄스 에너지를 얻을 수 있었다. 반복율이 1 Hz이며 펌핑 펄스폭이 5 ms일 때는 700 torr의 Kr 플래시 램프를 사용하는 경우 1.44 J의 고출력 펄스 에너지를 얻을 수 있었다.

### 2. 실험 장치 및 실험 결과

그림 1은 본 실험에 사용된 공진기의 구조를 나타내고 있다. Nd:YAG 결정의(Saint-Gobain사) 도핑 농도는 0.9 %

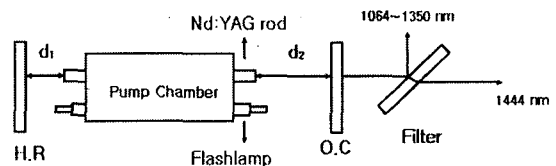


그림 1 실험 장치도.

Fig. 1 The schematic of the experimental setup.

\* 正 會 員 : 慶熙大 工大 電子情報工學科 博士課程  
\*\* 正 會 員 : 金鳥工大 自然大 自然科學部 教授  
\*\*\* 正 會 員 : (주) 루트로닉  
† 교신저자, 正會員 : 慶熙大 工大 電子情報工學科 教授

Email : ypkim@khu.ac.kr

接受日字 : 2006年 8月 1日

最終完了 : 2006年 10月 18日

이며 크기는 6 mm x 130 mm 이고 펌핑 영역은 100 mm 이다. 결정의 양쪽 면은 2° 기울어져 있고 무반사 코팅되어 1064 nm에서 0.08 %의 반사율을, 1319-1339 nm에서는 평균 0.4 %, 1444 nm에서는 0.6 %의 반사율을 갖는다. 펌핑 챔버(pumping chamber)의 반사면은 균일한 펌핑이 이루어질 수 있도록 세라믹(ceramic)소재를 사용 하였으며 플래시 램프의 유리에는 Ce<sup>3+</sup>이 도핑 된 제품을 사용하여 350 nm 이하의 자외선은 발생 하지 않도록 하였다.<sup>[6]</sup> 전반사 및 출력 거울은 모두 평면거울이며 전반사 거울은 1064 nm에서 95.3 %의 투과율을 갖고 1319-1339 nm에서는 평균 70 %의 투과율을 갖으며 1444 nm에서는 97.8 %의 반사율을 갖는다. 출력 거울은 1064 nm에서 97.2 %의 투과율을 갖고, 1319-1339 nm에서 평균 25 %의 투과율을 갖으며 1444 nm에서는 82.3 %를 반사 한다. 필터(filter)는 45°의 각도에서 1064-1350 nm에서 99 % 이상 반사하며 1444 nm 대역에서는 96.7 %의 투과율을 갖는다.

Nd:YAG 결정은 약 30개의 레이저 천이 선(transition line)을 가지고 있다. 그 중 1064 nm 및 1319, 1339 nm의 경우에는 1444 nm에 비하여 상대적으로 이득이 매우 높아 이 파장대역의 되먹임을 제거 시키지 않는 한 1444 nm의 출력을 얻을 수 없다.<sup>[2-3]</sup> 특히 1064 nm의 경우에는 입력 펌핑 에너지가 클 경우 매우 작은 되먹임에도 충분한 이득이 형성되어 발진이 일어난다. 따라서 필터를 장착 하여 혹시 발진하게 될지 모를 1064 nm 및 1319-1339 nm 대역의 에너지를 측정 하지 않도록 하였다.

전반사 거울과 출력 거울의 위치 d1, d2 는 Nd:YAG 결정의 표면으로부터 6 cm 떨어져 있으며 이 거리는 고정된 채 출력의 변화를 측정 하였다. 전원 공급 장치는 자체 제작하였으며 펌핑 펄스폭이 400 μs일 경우 사용된 전원 공급 장치의 축전기(capacitor)의 전기용량(capacitance)은 200 μF, 인덕턴스(inductance)는 160 uH 이다. 펌핑 펄스폭은 5 ms 인 경우에는 10 mF의 용량을 갖는 축전기 5개를 연속적으로 순차 방전하여 5 ms의 펌핑 펄스를 형성 시켰는데, 인덕턴스는 320 uH이다. 에너지의 측정은 초전소자(pyroelectric)를 사용하는 에너지 미터 중 μs와 ms 단위의 펄스폭을 갖는 광 펄스의 에너지를 측정 할 수 있는 Gentec사의 QE-50-ELP-MB를 사용 하였다. 출력 거울의 반사율은 참고문헌 [3]의 결과를 참조 하여 1444 nm의 파장에 대해 70 %, 80 %, 90 %의 반사율을 갖는 거울을 이용하여 에너지를 측정 해 본 결과 참고 문헌과 같이 80 %의 거울을 이용할 경우 제일 높은 출력을 얻을 수 있었다.

그림 2는 플래시 램프의 종류에 따른 1444 nm의 출력 특성을 나타내고 있다. 전원 장치의 전기용량이나 인덕턴스가 동일 할 경우 플래시 램프들의 임피던스 값에 따라 플래시 램프에 흐르는 전류의 양 및 첨두 전류 값이 변하게 된다. 각각 램프의 임피던스는 450 torr의 Xe 플래시 램프의 경우 16 Ω√A, 700 torr의 Xe 플래시 램프의 경우 17.4 Ω√A, Kr 플래시 램프의 경우 17.7 Ω√A이다. 펌핑 펄스가 400 μs일 경우 공진기의 광축 정렬로부터 발생할 오차를 배제하기 위하여 여러 번 재 정렬을 하여 측정하여 본 결과 그림 2에서 알 수 있듯이 펌핑 에너지가 낮을 경우에는 Kr 플래시 램프의 경우가 좀 더 좋은 출력 결과를 보이고 펌핑 에너지가 높아질수록 700 torr의 Xe 플래시 램프가 약간 높은

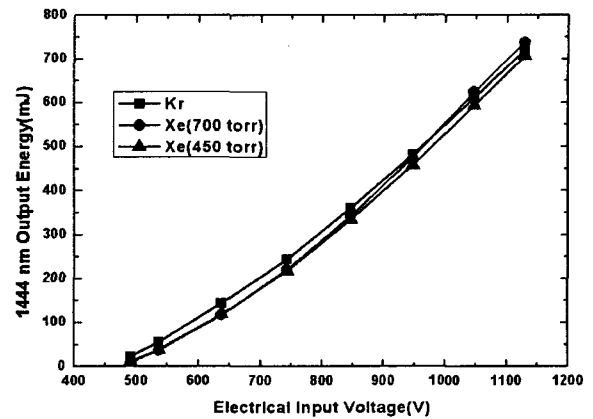


그림 2 펌핑 펄스폭이 400 μs일 경우 플래시 램프의 종류에 따른 1444 nm 레이저의 출력 특성.

Fig. 2 Dependence of pulse energy of Nd:YAG laser at wavelength of 1444 nm on type of flashlamp. 400 μs pump pulse duration.

출력 결과를 보였다. 1000 개 펄스 에너지의 평균을 5차례 측정 한 결과 1,047 V 근방에서부터 700 torr의 Xe 플래시 램프를 사용 하는 경우 미세하게 좀 더 높은 출력을 보이다가 본 전원 공급장치의 최대 작동 전압인 1,130 V에서 736 mJ로 712 mJ의 Kr 플래시 램프에 비하여 약간 높은 출력 값을 보였다. 실험 결과 펌핑 에너지를 더 크게 할 경우 700 torr의 Xe 플래시 램프와 Kr 플래시 램프의 출력은 좀 더 차이를 보일 것으로 예상된다. 펌핑 펄스폭이 400 ms일 경우 낮은 전류 밀도에서는 Kr 플래시 램프가 1444 nm를 발진하는데 있어 좀 더 적합한 스펙트럼을 방사하고 전류 밀도가 높아질수록 700 torr의 Xe 플래시 램프에서 방사되는 스펙트럼 선(spectrum line)이 1444 nm를 발진하는데 있어 좀 더 효율이 좋은 것으로 판단된다.

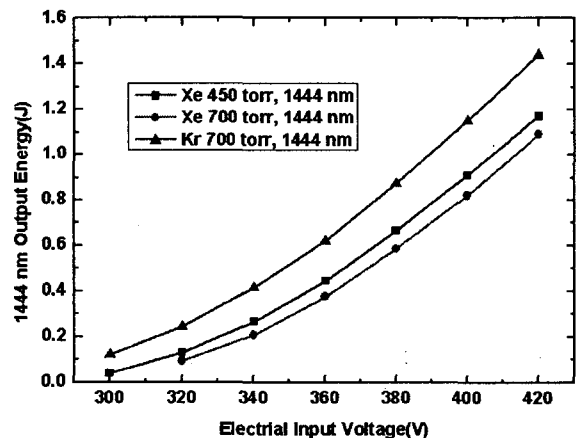


그림 3 펌핑 펄스폭이 5 ms일 경우 플래시 램프의 종류에 따른 1444 nm 레이저의 출력 특성.

Fig. 2 Dependence of pulse energy of Nd:YAG laser at wavelength of 1444 nm on type of flashlamp. 5 ms pump pulse duration.

그림 3은 펌핑 펄스가 5 ms일 때의 플래시 램프별 1444 nm 에너지를 측정 한 결과 이다. 반복율은 1 Hz 이며 100 회 평균 에너지를 기록 하였다. 펌핑 펄스폭이 400  $\mu$ s 일때와 다르게 5 ms에서는 Kr 플래시 램프를 사용 하는 경우 다른 두 플래시 램프에 비해 뚜렷하게 높은 출력 에너지를 보이며 700 torr의 Xe 플래시 램프는 400 torr의 Xe 플래시 램프 보다도 낮은 출력 에너지를 보인다.

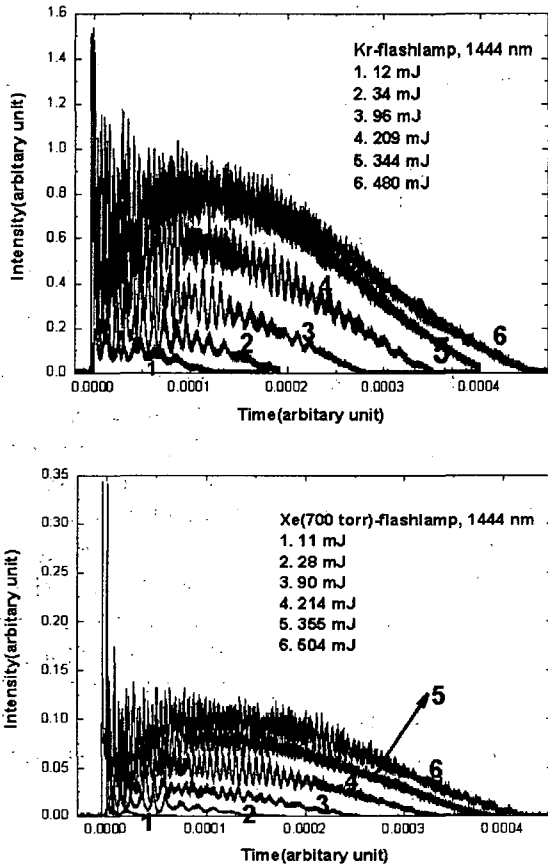


그림 4. Kr 및 Xe 플래시 램프에 따른 출력 에너지별 광 펄스 파형.

Fig. 4 Measured temporal optical pulse shape of various output energy.

Top: Kr-flashlamp. Bottom: Xe-flashlamp(700 torr)

그림 4는 펌핑 펄스폭이 400  $\mu$ s 일 때 700 torr의 Xe 플래시 램프와 Kr 플래시 램프를 사용했을 경우의 출력 에너지에 따른 광 파형이다. Kr 플래시 램프의 경우 펄스 앞부분의 스파이킹(spiking)이 Xe 플래시 램프 보다 상대적으로 작다. 이는 Kr 플래시 램프의 전류 파형을 살펴보면 0에서 첨두까지 걸리는 시간이 Xe 플래시 램프의 경우 보다 평균 25 % 정도 빠르기 때문이다. 따라서 이완발진(relaxation oscillation)의 완화 측면<sup>[7]</sup>에서는 Kr 플래시 램프가 유리하다고 판단된다.

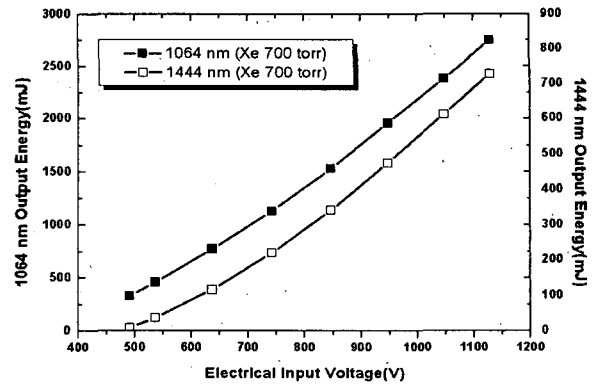


그림 5 펌핑 펄스폭이 400  $\mu$ s 일 경우 1064 nm와 1444 nm의 출력 에너지.

Fig. 5 In case pumping pulse width of 400  $\mu$ s, output energy at wavelength of 1064 nm and 1444 nm.

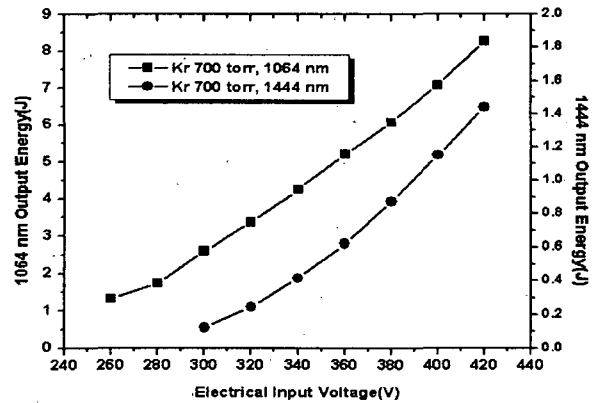


그림 6 펌핑 펄스폭이 5 ms일 경우 같은 입력 에너지에서 1064 nm와 1444 nm의 출력 에너지.

Fig. 6 In case pumping pulse width of 5 ms, output energy at wavelength of 1064 nm and 1444 nm.

그림 5는 그림 3의 실험 조건과 같은 전반사 거울 과 출력 거울 및 700 torr의 Xe 플래시 램프를 사용하여 1064 nm의 최대 출력을 측정하고 이를 1444 nm의 출력값과 비교한 결과이다. 1064 nm의 경우 출력 거울의 반사율이 10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 50 %인 거울을 이용하여 측정 한 결과 20 %의 경우 제일 높은 출력을 얻을 수 있었다. 따라서 출력 거울은 반사율이 20 %인 거울을 사용하여 측정 하였다. 펌핑 펄스폭이 400  $\mu$ s인 경우 본 실험에 사용한 전원 공급 장치의 최대 작동 가능한 전압인 1,130 V 에서 2.72 J의 1064 nm의 출력을 얻을 수 있었으며, 이때 1444 nm의 출력 에너지는 1064 nm 에너지의 약 27 %를 얻을 수 있었다. 그림 6은 펌핑 펄스폭이 5 ms일 경우의 1064 nm 와 1444 nm 에너지를 비교 이다. 5 ms일 경우에는 1064 nm 에너지의 약 17 %인 1444 nm 에너지를 얻을 수 있었다.

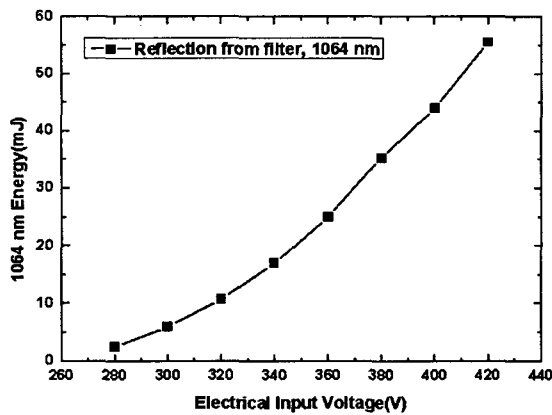


그림 7 필터에서 측정된 1064 nm의 에너지.  
Fig. 7 Measured pulse energy of 1064 nm from the filter.

1064 nm가 발진이 되지 않도록 전반사 거울과 출력 거울에서의 1064 nm 반사율을 5 %이하가 되도록 코팅 하였으나 5 ms 로 펌핑 하는 경우 필터에서 1064 nm의 에너지가 다소 측정이 되었으며 에너지 측정 결과를 그림 7에 나타내었다. 참고 문헌 [3]을 참조 하면 입력 에너지가 높을 경우 Nd:YAG 붕의 열렌즈 효과로 인한 구면수차가 발생하여 붕의 표면에 1444 nm의 이득이 형성되지 않아 1064 nm에 대하여 거울의 손실이 높더라도 발진이 가능함을 설명 하고 있다.

### 3. 결 론

플래시 램프로 펌핑하여 펄스로 동작하는 Nd:YAG 레이저에서 1444 nm 파장의 발진 특성을 조사 하였다. 세 종류의 플래시 램프로 실험한 결과 펌핑 펄스폭이 400  $\mu$ s일 경우 저출력에서는 Kr 플래시 램프가, 고출력에서는 700 torr의 가스 압력을 갖는 Xe 플래시 램프의 경우가 다소 효율이 좋았다. 펌핑 펄스폭이 5 ms일 경우에는 Kr 플래시 램프의 효율이 가장 좋았으며 펌핑 펄스폭이 400  $\mu$ s일때 와는 반대로 450 torr Xe 플래시 램프가 700 torr의 Xe 플래시 램프 보다 효율이 좋았다. 전류 밀도가 증가 할수록 700 torr의 Xe 플래시 램프 방사 스펙트럼이 Nd:YAG 결정에서 1444 nm를 발진시키기 위해 가장 적합 하다고 판단된다. 펌핑 펄스폭이 400  $\mu$ s인 경우 실험 결과를 유추해 볼 때 펌핑 입력 에너지를 증가 시키면 700 torr의 Xe 플래시 램프는 Kr 플래시 램프에 비해 더 높은 효율을 낼 수 있을 것으로 기대 된다. 그러나 이완 발진의 완화 측면에서는 전류의 상승시간이 상대적으로 빠른 Kr 플래시 램프가 Xe 플래시 램프 보다 유리한 면을 보였다. 같은 크기의 Nd:YAG 결정을 사용하여 1064 nm의 최대 출력과 비교하여 본 경우 1444 nm의 출력은 1064 nm에 비하여 약 27 %를 얻을 수 있었다. 1444 nm 파장은 물에 대한 흡수도가 26  $\text{cm}^{-1}$ 로[2] 비슷한 흡수도를 갖는 2080 nm 파장에서 발진하는 CTH:YAG (Cr, Tm, Ho:YAG) 레이저를 대체 할 수 있을 것으로 기대 된다. 더욱이 2.1 mm의 경우 실리카(silica) 광섬유로 전송 할 때 큰 손실이 발생하는 점을 감안 하면 의료용 분야에서 더욱더 활용 가치가 있다고 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 2006년도 (주) 루트로닉([구] 맥스엔지니어링)의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 감사 드립니다.

### 참 고 문 헌

- [1] F. Jia, Q. Zheng, Q. Xue, Y. Bu, L. Qian, "Yellow light generation by frequency doubling of a diode-pumped Nd:YAG lase," Opt. Comm., vol. 259, no. 1, pp. 212-215, 2006.
- [2] S. K. Wong, P. Mathieu and P. Pace, "Eye-safe Nd:YAG laser," Appl. Phys. Lett. vol. 57. no. 13, pp. 650-652, 1990.
- [3] N. Hodgson, W. L. Nighan, Jr. Douglas J. Golding, and D. Eisel, "Efficient 100-W Nd:YAG laser operating at a wavelength of 1.444  $\mu$ m," Opt. Lett.. vol. 19, no. 17. pp. 1328-1330, 1994.
- [4] H. M. Kretschmann, F. Heine, V. G. Ostroumov, and G. Huber, "High-power diode-pumped continuous-wave Nd<sup>3+</sup> lasers wavelengths near 1.44  $\mu$ m", Opt. Lett., vol. 22, no. 7. pp. 466-468, 1997.
- [5] A. Agnesi, S. Dell'Acqua, C. Pennacchio, G. Reali, and P. G. Gobbi, "High-repetition-rate Q-switched diode-pumped Nd:YAG laser at 1.444  $\mu$ m," Appl. Opt., vol. 37, no. 18, pp. 3984-3986, 1998.
- [6] Perkinelmer website, <http://opto-electronics.perkinelmer.com>
- [7] W. Koechner, Solid-State Laser Engineering (Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 1999) pp. 113-117

### 저 자 소 개



#### 이 희 철 (李熙澈)

1974년 04월 10일생. 1999년 금오공대 물리학과 졸업, 2000년~01년 광혼돈 현상 제어연구단 연구보조원, 2001년 금오공대 물리학과 졸업(석사), 2001년~현재 경희대 전자공학과(박사 수료), 2002년~현재 (주) 루트로닉 선임 연구원.

Tel : 016-426-4698

Fax : 031-901-3440

E-mail : perlpath@hanmail.net



**김 규 옥 (金奎旭)**

1960년 11월 14일생. 1983년 서강대학교 물리학과 졸업. 1985년 한국과학기술원 물리학과 졸업(이학석사). 1988년 동 대학원 물리학과 졸업(이학박사). 1988년~98년 한국표준과학연구원 선임연구원. 1990년~91년 일본 전자기술종합연구소 객원연구원. 1996년~현재 금오공과대학교 자연과학부 교수.

Tel : 054-478-7776

Fax : 054-478-7799

E-mail : gukim@kumoh.ac.kr



**김 동 현 (金東眩)**

1979년 12월 9일생. 2003년 금오공대 물리학과 졸업. 2005년 동 대학원 물리학과 졸업(석사), 2005년~현재 (주) 루트로닉 주임 연구원

Tel : 031-908-3440

Fax : 031-901-3440

E-mail : dhkim@lutronic.com



**공 승 환 (孔承渙)**

1957년 8월 10일생. 1979년 경북대 철학과 졸업. 1984년 동 대학원 졸업(석사), 1995년 레겐스부르크 대학 물리학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 졸업(박사) 1999년~2001년 배재대 광혼돈 현상 제어 연구단 선임 연구원, 2001년~03년, 경북대. 영남대. 대구 가톨릭대 강사. 2003년~현재 (주) 루트로닉 연구소장

Tel : 031-908-3440

Fax : 031-901-3440

E-mail : shgong@lutronic.com



**김 용 평 (金容平)**

1955년 2월 9일생. 1979년 경희대 전자공학과 졸업. 1981년 동 대학원 졸업(석사), 1986년 Keio 대학 전기 공학과 졸업(박사). 1986년~88년 Blakett Laboratory, Imperial college of Science and Technology(연구원), 1988년~96년 한국표준과학연구원 레이저 연구 실장, 1996년~현재, 경희대 전자정보학과 교수.

Tel : 031-201-2931

Fax : 031-203-2931

E-mail : ypkim@khu.ac.kr