

## 적외선 영역에서 광대역으로 파장 가변되는 연속 발진 Cr<sup>4+</sup>:YAG 레이저 개발

추한태

금오공과대학교 물리학과

이봉연 · 양준목 · 이동한

충남대학교 물리학과

임기수

충북대학교 물리학과

이치원

공주문화대학 전자통신과

(1999년 2월 9일 받음, 1999년 3월 29일 수정본 받음)

연속 발진 Nd:YAG 레이저를 펌핑 광원으로 하여 보다 조밀하고 견고하며, 안정된 연속 발진 파장 가변 Cr<sup>4+</sup>:YAG 레이저를 개발하여 레이저 출력 특성, 파장 가변성 및 발진 레이저 선폭 등을 조사하였다. 공진기 구조는 공진기 안정 조건을 계산하여 비점수차가 보상된 Z 자형 접합 공진기를 구성하였다. 공진기 출력 거울의 투과율이 1%일 때, 결정의 온도를 20°C로 유지하며 6 W로 펌핑하였을 경우, 중심 파장이 1.45 μm에서 최대 400 mW의 평균 출력을 갖는 매우 안정된 연속 발진 Cr<sup>4+</sup>:YAG 레이저를 얻을 수 있었으며, 출력 기울기 효율은 8%였다. 또한 공진기 내에 복굴절 필터를 삽입하여 1.399 μm에서 1.532 μm까지의 파장 가변 영역을 얻었고, 1.4903 μm에서 최대 340 mW의 평균 출력을 얻을 수 있었으며, 이때의 레이저 발진 선폭은 0.21 nm였다.

### I. 서 론

근적외선 영역의 파장 가변 레이저로는 Ti:sapphire 레이저, Cr:LISAF 및 Cr<sup>3+</sup>:forsterite 등이 있지만 가장 긴 파장 한계는 1.32 μm 정도이다. 한편 저손실 광섬유 전송 분야 및 광섬유 결합 시스템 등에 필수적으로 이용되는 파장은 1.50 μm 영역이다. 따라서 최근 몇 년 전까지만 해도 이 영역의 파장을 갖는 레이저를 얻기 위해선 액체 질소에 의해 냉각되는 알칼리 할라이드계의 결정을 이용하는 색중심(color center) 레이저<sup>1,2)</sup>를 개발하여 사용하였다. 그러나 색중심 레이저는 값이 매우 비싸고 결정을 저온으로 냉각(약 영하 40°C)해야 할 뿐 아니라, 결정 주위를 진공으로 유지시켜야 하며, 레이저 발진을 위한 광학 소자 정렬 등에 많은 어려움이 있는 단점을 가지고 있다. 따라서 최근에는 1.5 μm 정도의 파장을 요구하는 실험에는 기존의 색중심 레이저를 대신하여 실온에서 동작하는 파장 가변 Cr<sup>4+</sup>:YAG(chromium-doped yttrium aluminum garnet) 레이저가 많이 이용되고 있다.

Cr<sup>4+</sup>:YAG 레이저는 1988년 Angert<sup>3)</sup>등에 의해 최초로 보고된 이후 계속하여 큐 스위칭(Q-switching)<sup>4,5)</sup> Cr<sup>4+</sup>:YAG 레이저, 광음향 모드 록킹(acousto-optic mode-locking)<sup>6)</sup> 및 자체 모드 록킹(self mode-locking)<sup>7,8)</sup> 극초단 펄스 Cr<sup>4+</sup>:YAG 레이저와 고효율 연속 발진 Cr<sup>4+</sup>:YAG 레이저<sup>9)</sup>가 개발되었으며 이들의 파장 가변 영역은 1.34 μm에서 1.60 μm 정도이다.

그러나 아직까지 국내에서는 연속 발진 Cr<sup>4+</sup>:YAG 레이저의 개발조차 거의 전무한 상태이므로 학문적인 차원에서 뿐만 아니라 경제적 및 기반 기술 확보면에서도 기술 개발이 시급한 실정이다.

본 연구에서는 파장 1.064 μm의 연속 발진 Nd:YAG 레이저를 펌핑 광원으로 하여 보다 조밀하고 견고하며, 안정된 연속 발진 파장 가변 Cr<sup>4+</sup>:YAG 레이저를 개발하였다. 사용된 Cr:YAG 결정은 양면이 부루스터 각으로 연마된 길이 23 mm, 직경 5 mm, Cr 이온 도핑 농도가 0.15 wt.%이고, 공진기 구조는 네 개의 거울을 이용하여 비점수차가 보상된 Z 자형 접합 공진기를 구성하였다. 이때 공진기의 안정 조건을 계산하고, 광축 정렬 장치를 제작하여 공진기의 정렬을 최적화하여 레이저 발진이 용이하고 안정된 레이저 출력을 얻을 수 있도록 구성하였으며 결정의 형광 특성, 레이저의 출력 특성, 파장 가변성 및 레이저 선폭 등을 측정하였다.

### II. 이 론

#### 2.1. 공진기의 비점수차 보상

본 연구에서 사용된 Cr<sup>4+</sup>:YAG 레이저의 공진기 형태는 Fig. 1과 같이 Ti:sapphire 레이저 및 기타 다른 고체 레이저 공진기와 유사한 두 개의 평면 거울 M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub>와 두 개의 모목

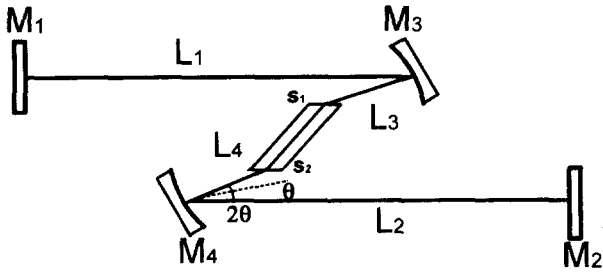


Fig. 1. The Z-fold laser cavity.

거울 M<sub>3</sub>, M<sub>4</sub>를 사용한 Z 자형 접힘 공진기 구조를 사용하였다. 이때, 양면이 부루스터 각으로 가공된 레이저 이득 매질인 Cr:YAG 결정은 두 개의 오목 거울 사이에 위치하게 된다. 그림에서 L<sub>1</sub>은 M<sub>1</sub>과 M<sub>3</sub>사이의 거리이고, L<sub>2</sub>는 M<sub>2</sub>와 M<sub>4</sub>의 거리이며, L<sub>3</sub> 및 L<sub>4</sub>는 각각 M<sub>3</sub>과 M<sub>4</sub>에서 결정면 S<sub>1</sub>과 S<sub>2</sub>사이의 거리를 나타낸다. 그림과 같은 공진기 구조에서는 필연적으로 구결면(sagittal plane)과 자오면(tangential plane)에서 레이저 비임이 이득 매질을 통과하는 광학적 경로 길이가 달라지는 비점수차가 발생한다.<sup>[10, 11]</sup> 만일 결정의 길이가 L이고 굴절률을 n이라 하면 구결면과 자오면에서 통과하는 유효거리 d<sub>s</sub> 및 d<sub>t</sub>는 다음과 같다.

$$d_s = L \frac{\sqrt{n^2 + 1}}{n^2}, \quad d_t = L \frac{\sqrt{n^2 + 1}}{n^4} \quad (1)$$

또한 오목 거울이 사용된 접힘 공진기 내에 레이저 비임이  $\theta$  라디안의 각으로 입사해야 함으로 구결면과 자오면에서 초점 거리 f<sub>s</sub>와 f<sub>t</sub>가 서로 다르게 되는 비점수차가 발생한다. 이때 오목 거울의 초점 거리를 f, 입사각이  $\theta$  라디안이라 하면

$$f_s = \frac{f}{\cos \theta}, \quad f_t = f \cos \theta \quad (2)$$

가 되며, 이러한 비점수차를 보상하려면 레이저 비임이 공진기를 한번 진행할 때 오목 거울에서 두 번 반사되고, 이득 매질을 한번 통과하므로

$$d_s - d_t = 2(f_s - f_t) \quad (3)$$

가 된다. 따라서 식 (1), (2)를 식 (3)에 대입하면

$$\begin{aligned} L \frac{\sqrt{n^2 + 1}}{n^2} - L \frac{\sqrt{n^2 + 1}}{n^4} &= 2 \left( \frac{f}{\cos \theta} - f \cos \theta \right) \\ &= 2f \sin \theta \tan \theta \end{aligned} \quad (4)$$

가 된다. 이때  $\theta$  가 작으면  $\sin \theta \approx \tan \theta \approx \theta$ 이고, 초점 거리 f는  $f = R/2$  이므로

$$L \frac{(n^2 - 1)\sqrt{n^2 + 1}}{n^4} = 2f\theta^2 = R\theta^2 \quad (5)$$

이 되고,  $\theta$  에 대하여 정리하면,

$$\theta = \sqrt{\frac{L}{R} \frac{(n^2 - 1)\sqrt{n^2 + 1}}{n^4}} \quad (6)$$

가 되며,  $\theta$  라디안을 각도  $\theta$  로 바꾸어 주면

$$\theta = 57.3 \sqrt{\frac{L}{R} \frac{(n^2 - 1)\sqrt{n^2 + 1}}{n^4}} \quad (7)$$

가 되어 입사각  $\theta$  는 결정의 길이, 굴절률 및 오목 거울의 초점 거리 등에 의해 결정된다. 위 식에 본 연구에 사용된 Cr:YAG 결정의 길이 L=23 mm, 굴절률 n=1.818과 오목 거울의 곡률반경 R=100 mm를 대입하면, 부루스터 각으로 가공된 결정면에 입사하는 비임의 입사각  $\theta=18.18^\circ$  임을 알 수 있다. 즉 공진기의 접힘각  $2\theta$ 를 조정함으로써 접힘 공진기의 비점수차를 보상할 수 있다.

## 2.2. Z 자형 접힘 공진기의 안정성

두 개의 평면 거울 및 두 개의 오목 거울을 이용하여 Z 자형 접힘 공진기 Fig. 1과 같이 구성할 경우 두 오목 거울의 경사와 양면이 부루스터 각으로 가공된 레이저 결정 매질으로 인한 비점수차 때문에 구결면과 자오면에서의 레이저 비임 크기가 다르게 된다. 따라서 접힘 공진기의 안정 영역은 구결면과 자오면에 대응하는 각각의 안정 영역을 중첩시켜 찾을 수 있다. 이때, 각 면에서 레이저 비임의 G 파라미터를 계산하기 위해서 단일 경로에 대한 ABCD 변환 행렬을 사용한다. ABCD 변환 행렬의 각 요소를 A, B, C, 및 D라 하고, 두 개의 평면 거울 M<sub>1</sub>과 M<sub>2</sub>의 곡률반경을 각각 R<sub>1</sub> 및 R<sub>2</sub>라고 하자. 이때, 레이저 공진기의 안정 조건의 범위는<sup>[12]</sup>

$$0 \leq G_1 G_2 \leq 1 \quad (8)$$

가 된다. 여기서  $G_1 = A - B/R_1$ 와  $G_2 = D - B/R_2$ 이며, M<sub>1</sub>과 M<sub>2</sub>가 평면 거울이므로  $R_1 = R_2 = \infty$ 가 된다. 또한 그림에서 이득 매질인 결정의 길이를 L, 굴절률을 n, 공진기의 접힘각을  $\theta$  및 두 오목 거울 M<sub>3</sub>, M<sub>4</sub>의 곡률반경을 모두 R이라고 하면, 공진기 단일 경로에 대한 ABCD 변환 행렬은

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}_i &= \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_4 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & t_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &\times \begin{bmatrix} 1 & L_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

가 된다. 여기에서 행렬 안의 첨자 i는 구결면(sagittal plane)과 자오면(tangential plane)에 대응하는 i=S와 i=T을 각각 나타낸다. 따라서 초점 거리 f<sub>i</sub>는 각각 f<sub>s</sub>=f/cos $\theta$ =R/(2 cos $\theta$ )와 f<sub>t</sub>=f cos $\theta$ =R cos $\theta/2$ 가 되고, 레이저 결정의 변환 행렬 요소 t<sub>i</sub>는 각각 t<sub>s</sub>=Ln와 t<sub>t</sub>=Ln<sup>3</sup>이 된다. 이 ABCD 변환 행렬의 결과는 Mathematica를 사용하였으며, G 파라미터는 각각

$$\begin{aligned} G_{1i} &= 1 - (2L_2 + Z + t_i)/f_i + L_2(Z + t_i)/f_i^2 \\ G_{2i} &= 1 - (2L_1 + Z + t_i)/f_i + L_1(Z + t_i)/f_i^2 \end{aligned} \quad (10)$$

가 된다. 여기서 Z=L<sub>3</sub>+L<sub>4</sub>이다. 이때 식 (10)에서 Z+t<sub>i</sub>항을 제거하면 다음과 같은 G<sub>1i</sub>와 G<sub>2i</sub>에 관한 선형 방정식을 얻을 수 있다.

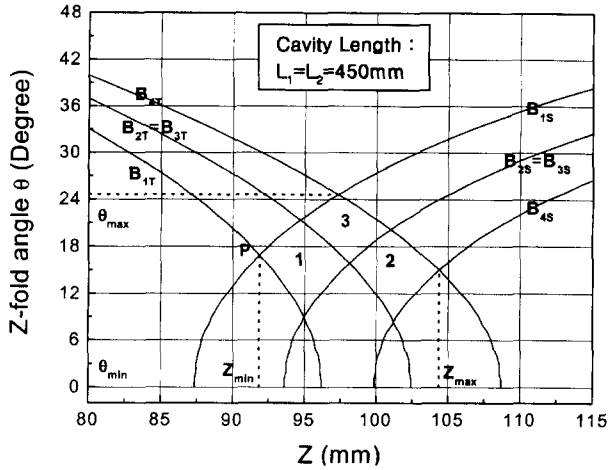


Fig. 2. Stable subregions and astigmatic compensation of  $L_1=L_2=450$  mm.

$$G_{2i} = (L_1 - f_i)G_{1i} / (L_2 - f_i) - (L_2 - L_1) / (L_2 - f_i) \quad (11)$$

따라서 공진기 안정 조건인 식(8)과 식(11)를 이용하면 다음과 같은 네 개의 안정 영역의 경계에 대한 Z의 해석적인 해  $Z_{ki}(\theta)$  ( $k=1, 2, 3, 4; i=S, T$ )를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} Z_{1i}(\theta) &= 2f_i - t_i \\ Z_{2i}(\theta) &= f_i + L_2f_i / (L_2 - f_i) - t_i \\ Z_{3i}(\theta) &= f_i + L_1f_i / (L_1 - f_i) - t_i \\ Z_{4i}(\theta) &= L_1f_i / (L_1 - f_i) + L_2f_i / (L_2 - f_i) - t_i \end{aligned} \quad (12)$$

이때, 각각의 해는  $Z_k(\theta)$ 가  $\theta$ 의 함수로 주어지며,  $L_1$ 과  $L_2$ 의 길이가 같은 대칭의 경우에는 경계 조건  $Z_2(\theta)$ 와  $Z_3(\theta)$ 가 같은 값을 갖는다. 식 (12)에 Cr:YAG 결정의 길이  $L=23$  mm, 굴절률  $n=1.818$  및 두 오목 거울의 초점 거리  $f=50$  mm를 대입하고,  $L_1$ 과  $L_2$ 의 길이가 450 mm인 대칭적 공진기 구조인 경우와  $L_1=450$  mm,  $L_2=1200$  mm 및  $L_1=700$  mm,  $L_2=1200$  mm인 비대칭 공진기인 경우에 대하여 열 렌즈 효과를 고려하지 않을 때 Z에 따른 비점수차 보상각과 안정 영역을 Fig. 2와 Fig. 3(a), (b)에 각각 나타냈다.

식 (12)와 Fig. 2 및 Fig. 3을 참고하면, 오목 거울의 초점 거리가 증가할수록 네 개의 경계가 오른쪽으로 이동하고, 특히 경계  $B_{2i}$  및  $B_{4i}$ 는 훨씬 더 이동하여 안정 영역의 면적이 증가한다. 또한 경계  $B_{1i}$ 는  $L_1$ 과  $L_2$ 에 영향을 받지 않으며,  $L_1 < L_2$ 인 경우  $L_1$ 이 증가하면  $B_{3i}$ 와  $B_{4i}$ 가 모두 왼쪽으로 이동하여 안정 영역 2의 면적은 변하지 않게 되고,  $L_2$ 가 증가하면  $B_{2i}$ 와  $B_{4i}$ 가 왼쪽으로 이동하여 안정 영역 1과 2의 면적이 감소한다. 따라서 경계 조건 Z가  $Z_{min} \leq Z \leq Z_{max}$ 에 놓여있고 공진기의 접합각  $\theta$ 가  $\theta_{min} \leq \theta \leq \theta_{max}$  사이에서 주어져야 전체적인 공진기가 안정적이며, 공진기의 총 거리 합이 1000 mm, 1750 mm 및 2000 mm일 때의 안정 영역을 만족하는 각  $\theta$ 는 공진기의 거리가 커질수록 접합각이 작아지는 것을 알 수 있으며 일정한 경계  $B_{1i}$ 로 접근하고 있다.

본 연구에서는 공진기 구조를  $L_1=L_2=450$  mm인 대칭형으로

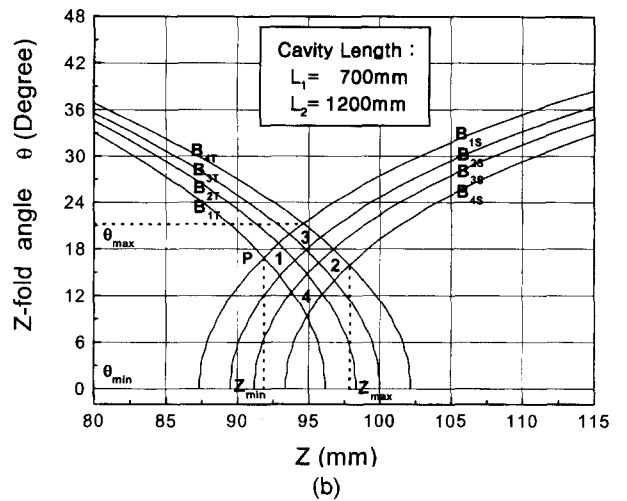
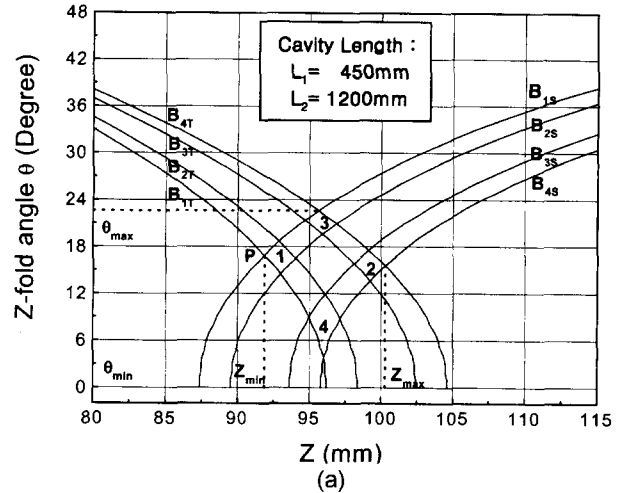


Fig. 3. Stable subregions and astigmatic compensation of  $L_3 < L_4$ . (a)  $L_1=450$  mm,  $L_2=1200$  mm (b)  $L_1=700$  mm,  $L_2=1200$  mm.

구성하였다. 이때 접합각, 결정 위치 및 거울  $M_3, M_4$ 를 마이크로미터로 미세 조정하여 레이저의 출력 및 안정성이 최대가 되도록 안정 영역으로 접근시켰으며, 접합각 및 거리 Z를 측정된 결과 각각  $18^\circ$  및 93 mm로 Fig. 2의 안정영역 I에 포함됨을 알 수 있었다.

### III. 실험 및 실험결과

#### 3.1. 실험

Cr:YAG 결정의 형광 특성, 연속 발진 레이저의 출력 특성, 파장 가변성 및 레이저 선폭 등을 조사하기 위한 실험 장치를 Fig. 4에 나타냈다.

그림에서와 같이 레이저 공진기는 두 개의 평면 거울인  $M_1$ 과  $M_2$ , 두 개의 오목 거울인  $M_3$ 와  $M_4$ 로 구성하였다. 두 개의 오목 거울의 곡률 반경은 모두 100 mm이고, 펌핑 광원의 파장인  $1.064 \mu\text{m}$ 에서는 고무과되며, 레이저 발진 중심 파장인  $1.450 \mu\text{m}$ 에서는 광대역으로 코팅된 이색 거울(dichroic mirror)이다. 또한 두 개의 평면 거울 중  $M_1$ 은  $1.450 \mu\text{m}$ 에

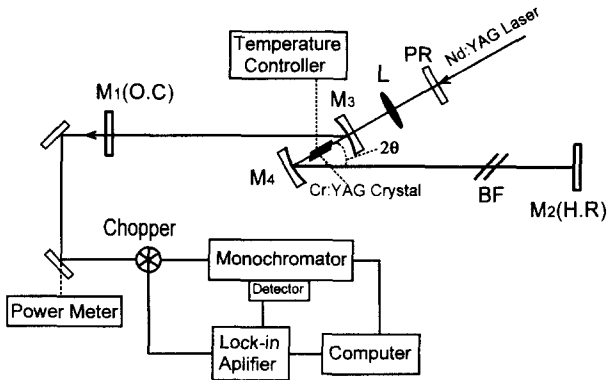


Fig. 4. The schematic diagram of the Cr<sup>4+</sup>:YAG laser system (PR: polarization rotator, L: lens of 100 mm focal length, M<sub>1</sub>: 1% or 5% output coupler, M<sub>2</sub>: high reflector, M<sub>3</sub>, M<sub>4</sub>: 100 mm radius of curvature mirrors, BF: birefringent filter).

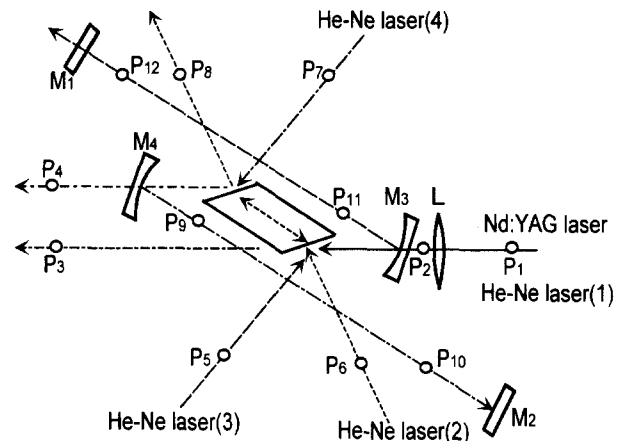


Fig. 5. The schematic diagram of the optical axis alignment with pinholes and He-Ne lasers.

서 투과율이 1%(또는 5%)인 출력 거울(output coupler)이고, M<sub>2</sub>는 고반사 거울(high reflector, R>99.9%)로서 모두 미국 CVI Laser Co.에서 구입하여 사용하였으며, 파장 가변을 위해 복굴절 필터 BF를 사용하였다. M<sub>3</sub>과 M<sub>4</sub> 사이에 삽입된 Cr:YAG 결정은 양쪽이 부루스터 각으로 연마된 직경 5 mm, 길이 23 mm 및 Cr<sup>4+</sup>의 도핑 농도가 0.15 wt.% 인 Union carbide 사 제품을 구입하여 사용하였다. 펌핑 광원으로는 파장이 1.064 μm이고 최대 출력 12 W인 연속 발진 Nd:YAG 레이저(Quantronix Co. Mo. 116EF)를 사용하였고, 펌핑 효율을 높이기 위하여 편광 회전기인 PR을 통해 펌핑 레이저의 편광을 90도 회전시켜 초점 거리 100 mm인 렌즈 L을 통해 결정으로 강하게 집속시켰다. 따라서 결정의 온도가 매우 높게 상승하여 결정을 손상시킬 뿐 아니라 발진 레이저의 출력 감소 및 안정성 저하를 초래하므로 결정의 온도를 항상 일정하게 유지시켜야 한다. 이를 위해 알루미늄으로 가공한 지지대에 결정을 고정시키고 자동 온도 조절기에 의해 구동되는 열전 냉각기 위에 장착하여 결정 온도를 일정하게 유지시켰다. 그림에서 PR, L, Cr:YAG 결정, M<sub>3</sub> 및 M<sub>4</sub>는 정밀 이동이 가능한 하나의 레일(THK Co., Ltd. RSR12WV370) 위에 설치하고 마이크로미터를 부착하여 3차원 이동이 가능하도록 하였으며 특히, Cr:YAG 결정은 경사도 및 회전각 이동까지 가능하도록 설계 제작하였다. 그림에서 chopper, monochromator, lock-in 증폭기, 컴퓨터 등은 결정의 형광 특성 및 레이저 발진 선폭을 측정하기 위해 설치하였다.

한편, Ti:sapphire 레이저와는 달리 Cr<sup>4+</sup>:YAG 레이저는 펌핑 파장 및 발진 파장이 모두 적외선 영역이므로 레이저 발진 및 안정된 출력을 얻기 위해서 매우 정밀한 광축 정렬과 세심한 주의가 필요하다. 따라서 Fig. 5와 같이 4대의 He-Ne 레이저와 자체 제작한 12개의 핀홀을 광학대 위에 장착하고 정밀한 광축 정렬을 수행하였다. 이때 각 핀홀의 위치는 Beam 4 optical ray tracer(Canada, Stellar Software) 프로그램을 이용하여 펌핑 및 레이저 발진 파장에 대한 공진기 구성 소자의 굴절률, 두께, 곡률반경, 위치, 접합각 등을 입력하여 광축 정렬 전산 시뮬을 한 후, 이를 Auto Cad R15 프로그램을 사용하여 오차한계 ±5 μm정도로 위치시켰다. 이때 편

홀의 직경은 0.5 mm, 1.0 mm, 2.0 mm, 3.0 mm, 5.0 mm 인 5종류를 사용하였고, 핀홀의 높이는 공진기 내의 레이저 공진 모드의 광축과 정확하게 일치시켰다.

광축 정렬은 공진기의 구성 요소를 모두 제거하고 펌핑 레이저인 Nd:YAG 레이저 및 He-Ne 레이저(1)의 광경로 모두가 핀홀 P<sub>1</sub>과 P<sub>2</sub>를 통과하도록 맞춘 후, 렌즈 L과 거울 M<sub>3</sub>을 삽입하고 펌핑 레이저의 광경로가 핀홀 P<sub>3</sub>을 통과하도록 L 및 M<sub>3</sub>을 조정한다. 다음에 Cr:YAG 결정 및 M<sub>4</sub>를 공진기 안정 영역에 위치시키고 펌핑 레이저의 광경로가 핀홀 P<sub>4</sub>를 통과하도록 조정하며, 결정의 경사도, 회전각 및 위치는 He-Ne 레이저(2)가 핀홀 P<sub>5</sub>를 통과하여 P<sub>8</sub>로 나오도록 조정한다. 또한 M<sub>3</sub>과 M<sub>4</sub>의 접합각 및 위치는 He-Ne 레이저(3)과 He-Ne 레이저(4)가 결정의 각 양면에 입사하여 반사되는 광경로가 각각 핀홀 P<sub>5</sub>, P<sub>11</sub>, P<sub>12</sub> 및 P<sub>7</sub>, P<sub>9</sub>, P<sub>10</sub>를 통과하도록 조정하였으며, M<sub>1</sub> 및 M<sub>2</sub>의 위치 및 기울기는 핀홀 P<sub>10</sub>과 P<sub>12</sub>를 통과한 비임이 핀홀 P<sub>10</sub>과 P<sub>12</sub>로 되입사되도록 조정하였다. 이때 핀홀 직경을 가장 큰 5.0 mm부터 시작하여 3.0 mm, 2.0 mm, 1.0 mm, 0.5 mm 순으로 바뀌가며 광축 정렬의 정밀도를 높였다.

한편 최초의 레이저 발진은 출력 거울인 M<sub>1</sub> 뒤에 분광기(Jobin Yvon Mo. H25, France) 위치시켜 펌핑 광원의 파장인 1.064 μm을 분리시키고 레이저 발진 중심 파장인 1.450 μm만을 통과하도록 맞춘 후, Germanium 다이오드와 연결된 검출기를 이용하여 결정의 형광 세기를 측정하면서 결정 및 광학 소자들의 위치, 기울기 및 회전각 등을 미세 조정하면 형광의 세기가 감소하거나 증가하게 되며, 증가하는 방향으로 정렬을 계속하면 레이저가 발진하게 된다.

### 3.2. 실험결과

Cr<sup>4+</sup>:YAG 레이저를 발진하기 위해선 전술한 바와 같이 광축 정렬을 한 후 Cr:YAG 결정의 형광 세기가 출력 거울 쪽으로 가장 강하게 나오도록 렌즈 L를 비롯한 공진기 거울 M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub>, M<sub>3</sub>, M<sub>4</sub>, 및 결정의 위치, 경사도, 회전각 등을 미세 조정하여야 한다.

Fig. 6에 레이저가 발진되기 직전의 형광 세기를 실온(20°C)

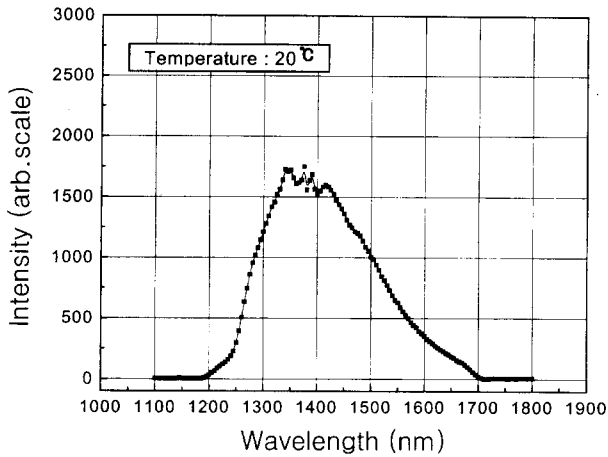


Fig. 6. The emission spectrum of the Cr<sup>4+</sup>:YAG crystal at room temperature(20°C) using Nd:YAG excitation at 1.064 μm.

에서 측정하여 나타냈다.

그림에서와 같이 형광의 파장 영역은 1.2 μm에서 1.7 μm까지이고 중심 파장은 1.37 μm이었으며, 레이저 발진 영역인 1.34 μm에서 1.60 μm를 모두 포함하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7 에는 출력 거울 M<sub>1</sub>의 투과율이 1.45 μm에서 각각 1%와 5%일 때 Nd:YAG 레이저의 펌핑 출력에 대한 연속 발진 Cr<sup>4+</sup>:YAG 레이저의 평균 출력을 나타냈다. 이때 결정의 온도는 20°C로 유지시켰고, 발진 레이저의 출력은 공진기 안정 영역 내에서 각각의 공진기 거울 및 결정의 위치 등을 미세 조정하여 최적의 레이저 발진 상태로 유지시킨 후에 측정하였으며, 발진 중심 파장은 분광기로 확인한 결과 1.450 μm 였다.

그림에서와 같이 출력 거울의 투과율이 1%와 5%일 때의 문턱 펌핑 출력은 각각 1 W 및 2.2 W정도이고, 출력 기울기 효율은 각각 8% 및 13% 정도이며, 6 W 펌핑에 대하여 각각 최대 400 mW 및 500 mW의 평균 출력을 얻을 수 있었으나, 출력 변동률은 1%인 경우가 더 안정적으로 나타났다. 또한 펌핑 출력이 6 W까지는 Cr<sup>4+</sup>:YAG 레이저의 평균 출

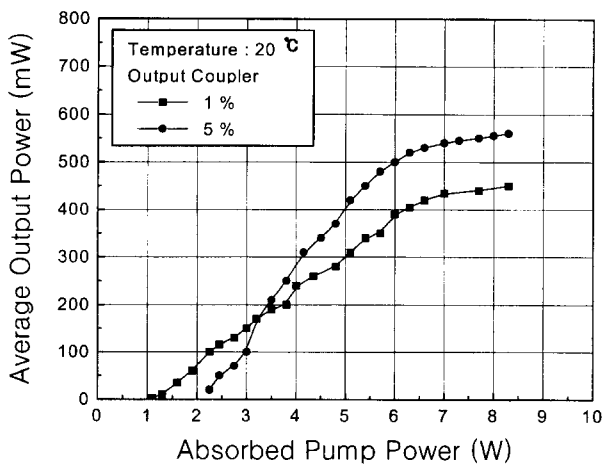


Fig. 7. The variation of the average output power as a function of the absorbed pump power at 20°C for different output couplers.

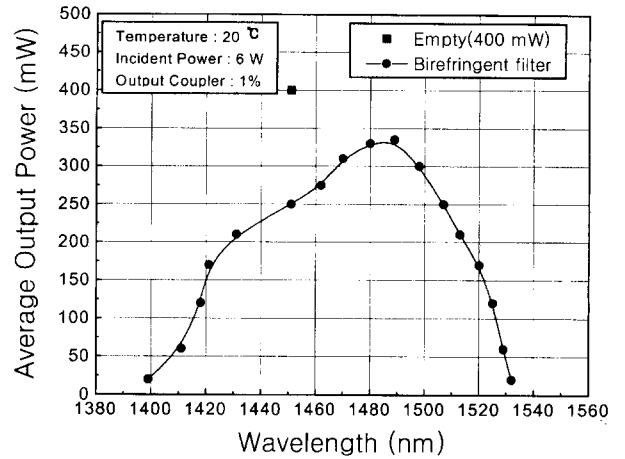


Fig. 8. The variation of the average output power as a function of the emission wavelength by tuned birefringent filter.

력이 거의 선형적으로 증가하고 출력 변동률의 폭이 매우 작은 안정된 레이저를 얻을 수 있었지만, 그 이상에서는 출력 변동률의 폭이 갑자기 증가하면서 출력의 포화 현상이 나타난다. 이때 레이저 결정의 표면을 관찰한 결과, 작은 반점과 같은 결정의 손상이 발견되었다. 따라서 레이저 출력의 포화 및 안정성 저하 현상은 강한 펌핑 레이저의 집속에 따른 결정의 손상과 더불어 레이저 매질 내의 강한 열 렌즈 효과로 인해 공진기 안정 영역이 극도로 좁아져서<sup>[12]</sup> 집합 거울사이의 거리인  $Z(=L_3+L_4)$ 와 공진기 팔의 길이( $L_1, L_2$ )에 따른 비점수차 보상각이 공진기 안정 영역으로부터 벗어났기 때문이다. 따라서 안정되고 더 높은 레이저 출력을 얻기 위해선 새로운 펌핑 방법, 결정의 고른 냉각 방법 및 열 렌즈 효과가 고려된 공진기의 구성 등이 필요하며 이에 대해서도 연구가 진행중이다.

Fig. 8 및 Fig. 9에는 펌핑 출력을 6 W로 고정하고 투과율이 1%인 출력 거울을 사용했을 때 공진기 내에 복굴절 필터를 삽입하여 연속 발진 Cr<sup>4+</sup>:YAG 레이저의 파장 가변 영역 및 발진 레이저 선폭을 각각 나타냈다. 실제로 Cr<sup>4+</sup>:YAG 레

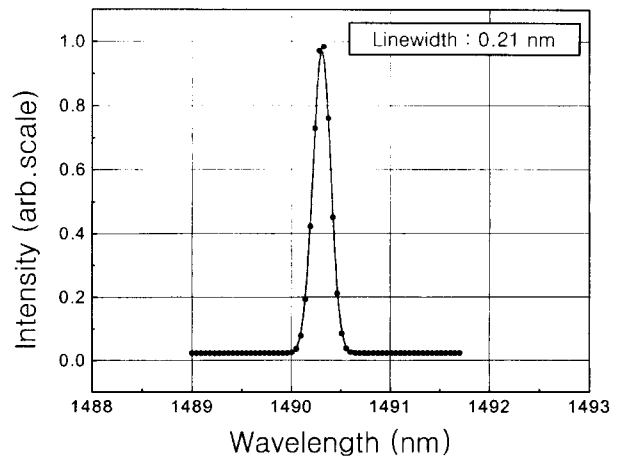


Fig. 9. The spectrum of the Cr<sup>4+</sup>:YAG laser by tuned birefringent filter. The center wavelength and the linewidth are 1.4903 μm and 0.21 nm, respectively.

이저의 발진 효율은 공진기 안의 작은 손실에도 큰 영향을 받으므로 복굴절 필터를 삽입할 때에도 세심한 공진기의 재정렬이 필요하다.

그림에서와 같이 복굴절 필터를 삽입하지 않은 빈 공진기인 경우의 Cr<sup>4+</sup>:YAG 레이저의 중심 파장은 1.45  $\mu\text{m}$ 에서 최대 400 mW의 평균 출력을 나타내지만, 복굴절 필터 삽입으로 인해 약간의 출력 감소를 나타내고 있다. 파장 가변 영역은 1.399  $\mu\text{m}$ 에서 1.532  $\mu\text{m}$ 이며 1.4903  $\mu\text{m}$ 에서 최대 340 mW의 평균 출력을 나타냈고, 이때 레이저 선폭은 0.21 nm였다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 파장 1.064  $\mu\text{m}$ 의 연속 발진 Nd:YAG 레이저를 펌핑 광원으로 하여 보다 조밀하고 견고하며, 안정된 연속발진 파장 가변 Cr<sup>4+</sup>:YAG 레이저를 개발하였다. 사용된 Cr:YAG 결정은 양면이 부루스티 각으로 연마된 길이 23 mm, 직경 5 mm 및 Cr 이온 도핑 농도가 0.15 wt.%이고, 공진기 구조는 네 개의 거울을 이용하여 비점수차가 보상된 Z 자형 접힘 공진기를 구성하였다. 이때 공진기의 안정 조건을 계산하고, 광축 정렬 장치를 제작하여 공진기의 정렬을 최적화하여 레이저 발진이 용이하도록 구성하였으며 결정의 형광 특성, 레이저의 출력 특성, 파장 가변성 및 레이저 선폭 등을 측정하였다.

Cr:YAG 결정의 형광 스펙트럼 영역은 1.2  $\mu\text{m}$ 에서 1.7  $\mu\text{m}$ 까지로 레이저 발진 영역인 1.34  $\mu\text{m}$ 에서 1.60  $\mu\text{m}$ 을 모두 포함하고 있음을 알 수 있다. 6 W의 Nd:YAG 레이저 펌핑 출력에 대하여 중심 파장이 1.45  $\mu\text{m}$ 인 연속 발진 Cr<sup>4+</sup>:YAG 레이저의 최대 평균 출력은 출력 거울의 투과율이 1%와 5%인 경우 각각 400 mW 및 500 mW였고, 이때의 출력 기울기 효율은 각각 8% 및 13%로 나타났다. 출력 거울의 투과율이 1%인 경우 공진기 내에 복굴절 필터를 삽입하여 1.399  $\mu\text{m}$ 에서 1.532  $\mu\text{m}$ 까지의 파장 가변 영역을 얻었으며, 1.4903  $\mu\text{m}$ 에서 최대 340 mW의 평균 출력을 얻을 수 있었으며, 레이저 선폭은 0.21 nm였다.

본 연구에서 개발한 연속발진 Cr<sup>4+</sup>:YAG 레이저는 저손실 광섬유 전송 분야 및 광섬유 결합 시스템 등 광통신 분야에 적극 활용할 계획이며, 계속하여 출력 효율 및 안정성을 더욱

향상시키고 Kerr lens 모드 록킹 등을 이용한 극초단 펄스를 발생시켜 비선형 광학과 반도체 연구 분야 및 초고속 분광학에 이용할 계획이다.

#### 감사의 글

본 연구 과제는 금오공과대학교 97년 과제수탁촉진연구비 및 97년 한국과학재단 특정기초(97-0702-03-01-3) 연구비 지원으로 연구되었습니다. 또한 본 실험에 많은 도움을 주신 전자통신연구소 김경현 박사님께도 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] C. P. Yakymyshyn, J. F. Pinto and Clifford R. Pollock, *Opt. Lett.* **14**, 621 (1989).
- [2] G. T. Kennedy, R. S. Grant and W. Sibbett, *Opt. Lett.* **18**, 1736 (1993).
- [3] N. B. Angert, N. I. Borodin, V. M. Garmash, V. A. Zhitnyuk, A. G. Okhrimchuk, O. G. Siyuchenko and A. V. Shestakov, *Appl. Phys. Lett.* **52**, 1040 (1988).
- [4] N. I. Borodin, V. A. Zhitnyuk, A. G. Okhrimchuk, O. G. Siyuchenko and A. V. Shestakov, *Izv. Akad.Nauk SSSR Ser. Fiz.* **54**, 1500 (1990).
- [5] W. Jia, H. Eilers, W. M. Dennis, W. M. Yen and A. V. Shestakvo, *Optical Society of America, Washington, D.C.* **13**, p. 31 (1992).
- [6] P. M. W. French, N. H. Rizivi and J. R. Taylor, *Opt. Lett.* **18**, 39 (1993).
- [7] Alphan Sennaroglu, Clifford R. Pollock and Howard Nathel, *Opt. Lett.* **19**, 390 (1994).
- [8] Yuzo Ishida and Kazunori Naganuma, *Opt. Lett.* **19**, 2003 (1994).
- [9] Alphan Sennaroglu and Clifford R. Pollock and Howard Nathel, *J. Opt. Soc. Am. B*, **12**, 930 (1995).
- [10] H. W. Kogelnik, E. P. Ippen, A. Dienes, and C. V. Shank, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-8**, 373 (1972).
- [11] F. A. Jenkins and H. E. White, *Fundamentals of Optics*, (McGraw-Hill Inc., 1976).
- [12] X. G. Huang, W. K. Lee, S. P. Wong, J. Y. Zhou and Z. X. Yu, *J. Opt. Soc. Am. B*, **13**, 2863 (1996).

**Development of the continuous-wave Cr<sup>4+</sup>: YAG laser with a broad tunability in the infrared region**

Han Tae Choo

*Dept. of Physics, Kumoh National University of Technology, Kumi 730-701, Korea*

Bong Yeon Lee, Joon Mook Yang and Dong Han Lee

*Dept. of Physics, Chungnam National University, Taejeon 305-764, Korea*

Ki Soo Lim

*Dept. of Physics, Chungbuk National University, Cheongju 316-763, Korea*

Chi Weon Lee

*Dept. of Electronic Communication, Kongju National Culture College, Kongju 314-040, Korea*

(Received February 9, 1999, Revised manuscript received March 29, 1999)

We have investigated the output power performance of a continuous-wave chromium-doped YAG laser (Cr<sup>4+</sup>: YAG laser), pumped by a Nd: YAG laser. With an output coupler of 1% transmission, we obtained as much as 400 mW of the average output power at 1.450  $\mu\text{m}$ . The power slope efficiency of 8%, when the gain medium was cooled to 20°C. We tuned the wavelength of the Cr<sup>4+</sup>: YAG laser, at pump power of 6 W, by using birefringent filter. As a result, lasing wavelength was tuned from 1.399  $\mu\text{m}$  to 1.532  $\mu\text{m}$ , with the maximum output power of 340 mW at 1.4903  $\mu\text{m}$  and the linewidth was 0.21 nm.