

반도체 레이저에 의해 펌핑되는 Cr:LiSAF 레이저의 연속 발진 특성*

윤장한 · 박종대 · 조창호

배재대학교 물리학과

이재형 · 장준성

서울대학교 물리학과

(1996년 11월 19일 받음)

반도체 레이저에 의해 펌핑되는 Cr:LiSAF 레이저를 제작하였다. 펌핑 레이저는 고출력의 반도체 레이저(SDL 7432-H1)였으며, 674 nm에서 최대출력은 500 mW 이었다. 레이저 결정은 plano-Brewster 모양의 Cr:LiSAF 으로 Cr³⁺의 농도가 3%, 길이가 3 mm, 결정의 평면인 면은 펌프레이저를 최대로 투과하고, 800-880 nm 대역에서 최대 반사율을 갖도록 코팅된 것을 사용하였다. 결정에 의한 비점수차를 보정하기 위해 V 자형 공진기를 사용하였다. 펌핑 레이저의 출력이 290 mW일 때 Cr:LiSAF 레이저의 출력은 19.4 mW이었다. 광축의 각이 큰 복굴절 필터를 사용하여 레이저 파장을 840-880 nm 파장 범위에서 가변할 수 있었으며, 복굴절 필터의 특성은 이론과 잘 일치 하였다.

I. 서 론

최근 반도체 레이저 펌핑에 의한 고체 레이저의 개발에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 반도체 레이저의 장점은 효율이 높고, 소형이며, 운영비가 적게 들며, 수명이 길다는 점이다. 반도체 레이저로 펌핑되는 레이저의 대표적인 예는 Nd:YAG, Nd:YVO₄, Nd:YLF, 광섬유 레이저, Er:YAG, Cr:LiSAF, Cr:LiSGAF, Cr:LiCAF 등인데, Nd:YAG 레이저의 경우 수십 와트의 출력을 얻을 수 있고, 제 2고조파나 파라메트릭 발진을 통하여 고출력의 여러 파장의 레이저 광원을 얻을 수 있어서 다른 레이저의 펌핑이나 분광학적 광원, 기타 과학 연구에 응용될 수 있다. 다른 펌핑 방식에 비해 반도체 레이저 펌핑 방식이 갖고 있는 장점은 반도체 레이저가 (1) 소형이며, (2) 효율이 높고, (3) 수명이 길고, (4) 레이저 빔의 안정성이 높은 점 등이다. 앞으로 펌프용 반도체 레이저의 가격이 낮아지고, 고출력이 되며, 레이저 빔의 질도 향상될 것으로 기대되어, 반도체 레이저에 의해 펌핑되는 고체 레이저는 많은 발전이 있을 것으로 기대된다.

Cr:LiSAF crystal은 1989년 Payne^[1] 등에 의해 발명되었는데, 400-500, 600-700 nm의 흡수대역을 가지고 있어서 적색의 반도체 레이저에 의해서 pumping이 가능하다. 또한 아르곤 레이저,^[2] 크립톤 레이저,^[3,4] 색소 레이저, Nd:YAG, Nd:YVO₄, Nd:YLF 레이저의 제2고조파,^[5] 플래시 램프^[6]등에 의해 펌핑될 수 있다. Cr:LiSAF와 비슷한 영역에서 발진하는 티타늄 사파이어 레이저는 여기상태의 수명이 3.2 μs로서 짧기 때문에 대부분 큰 규모의 고출력 레이저들에 의해 펌핑되나, Cr:LiSAF의 여기 상태의 수명은 67 μs로서,^[1] 저출력의 소형 반도체 레

이저에 의해 펌핑이 가능하다.^[7-28] Cr:LiSAF의 발진 대역폭은 180 nm로서 티타늄사파이어의 발진 대역폭 230 nm 보다 작지만 극초단 펄스를 발생시키기에 충분하다. 반도체 레이저로 펌핑되는 극초단 Cr:LiSAF 레이저에서 34 fs 극초단 펄스를 얻을 수 있음이 보고된 바 있다.^[9] Cr:LiSAF의 유효 방출 단면적은 $0.5 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ ^[11]으로 티타늄 사파이어의 유효 방출단면적 $4.1 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ 보다 작아 이득이 작으므로, 레이저 공진기 안에서의 레이저 빔의 손실이 작도록 설계 되어야 한다. 이로 인해 출력경의 최적 투과율이 작아 레이저 출력도 작게 된다. 또한 Cr:LiSAF는 열 전도율^[23]이 Nd:YAG의 1/10 정도이고, 열에 의한 팽창이 비등방적으로 이루어져, 펌프 레이저에 의한 급격한 열이 발생할때, 결정이 손상을 입을 가능성이 있다. 최근에 Cr:LiSGAF이 발명되었는데^[29] 열팽창계수가 작고 비등방성이 작아, 결정 성장시 생길 수 있는 strain에 의한 왜곡이나 맥리가 줄어들며 이로 인해, 결정에 의한 손실이 줄어들므로써 레이저 출력이 높아질 것으로 기대된다. 비교적 저출력이지만 Cr:LiSAF 레이저는 파장이 가변하고, 고체 레이저여서 선폭이 좁고 주파수 안정도도 좋게 할 수 있으므로 분광학 등에 이용될 수가 있고, 모드 록킹을 시키면 극초단 레이저 펄스를 얻을 수 있으므로, 빠른 현상 분석, THz 파 발생, 극초단 펄스의 고출력을 이용한 2 광자 공초점 현미경 등의 여러 분야에 이용될 수 있다. 특히 Cr:LiSAF은 고효율의 휴대 가능한 극초단 레이저 시스템을 만들 수 있다는 점에서 많이 연구되고 상용화될 전망이다.

II. 극초단 레이저용 복굴절 필터 해석

복굴절 필터는 1933년 Lyot^[30]에 의해 제안되었고, 레이저 안에서 Brewster각으로 사용하는 것은 1974년 Bloom^[31]에 의해 해석 되었으며, quartz를 사용한 실용적인 복굴절 필터는

* 이 연구는 1995년도 교육부 기초과학육성연구비 및 한국과학재단 연구비(941-0200-039-1)지원에 의한 것임. (BRSI 95-2421)

Holtom 등^[32]에 의해 고안되었다. 복굴절 필터는 복굴절 결정 내에서 파장에 따라 편광이 회전하는 것과 편광에 따라 광학계의 손실 또는 투과율이 다른 것을 이용한 것이다. 복굴절 필터는 레이저 공진기 내에서 대부분 Brewster각으로 레이저 빔이 입사하도록 설치되게 된다. 이때 복굴절 필터의 면과 결정축과 이루는 각을 dive-angle 이라 하는데, 이 각은 복굴절 필터의 파장 가변 범위, 투과 대역폭 등에 영향을 미치게 된다. 상용으로 판매되는 대부분의 복굴절 필터는 dive-angle이 0-17° 인 것이 많으며 연속 발진용에 많이 사용되고 있다. 그런데 최근 Naganuma 등^[33]은 극초단 레이저에 사용할 수 있는 복굴절 필터를 고안하였다. 이들은 dive-angle 이 66° 인 복굴절 필터를 사용하면, 필터가 약 5배 정도 두꺼워 지지만 필터의 대역폭을 약 4배 정도 가변할 수 있음을 보였다. 이들이 제안한 것을 요약하면 다음과 같다.

그림 1에서와 같이 레이저 빔이 Brewster 각으로 복굴절 필터에 입사하는 경우, 복굴절 결정의 dive-angle을 θ , 정상광선의 굴절 각을 ϕ , 입사면에 대한 결정축의 방위각을 α 라고 하자. 임의의 편광을 가진 빛이 Brewster각으로 복굴절 필터에 입사하였을 때, 입사 편광은 복굴절 필터에서 정상광선과 이상광선에 해당하는 고유편광으로 분해될 수 있으며, 각 광선은 정상광선 굴절률과 이상광선 굴절률에 해당하는 유효 굴절률을 느끼게 된다. 복굴절 필터의 두께가 L 이라 했을 때, 두 고유 광선의 위상 차이는^[33]

$$\psi = f_b \frac{k \delta L}{\cos \phi}$$

$$f_b \equiv \sin^2 \gamma = \cos^2 \theta \sin^2 \alpha + (\cos \phi \cos \theta \cos \alpha - \sin \phi \sin \theta)^2 \quad (1)$$

가 된다. 여기서 $\delta = n_e - n_o$ 로 이상광선과 정상광선의 굴절률 차이이고 k 는 진공에서의 파수이다. 위상차 ψ 가 $2N\pi$ 일 때 필터의 차수를 N 이라 하면 입사 편광과 투과 편광은 같아지게 되고, p 편광의 입사빔은 Brewster 각으로 놓여있는 필터의 면 또는 레이저 결정면등에 의해 손실이 발생하지 않게 된다. 만일 위상차가 2π 의 배수가 아니라면 편광이 회전하게

되어, p 편광이 입사했을 때, s 편광 성분이 생기게 되고, s 편광은 Brewster 면등에서 반사를 일으켜 손실이 발생하게 된다. 식 (1)에서 방위각 α 를 변화시키면 $f_b(\alpha)$ 가 변하고 식 (1)에서 좌변이 $2N\pi$ 가 되는 파장이 바뀌게 된다. 즉 방위각을 변화시키기에 따라 중심 파장을 바꿀 수 있다. 필터의 중요한 기능은 파장 선택성인데 중심파장에서 벗어난 파장의 빛이 겪는 손실과 중심 파장의 빛이 겪는 손실과의 차이는 큰 것이 좋다. 한편 고유 편광 ψ_o 와 ψ_e 은 근사적으로 다음과 같이 쓸 수 있다.^[33]

$$\psi_o \cong -\psi_s \cos \alpha_{eq} + \psi_p \sin \alpha_{eq}$$

$$\psi_e \cong \psi_s \sin \alpha_{eq} + \psi_p \cos \alpha_{eq} \quad (2)$$

여기서 ψ_s 와 ψ_p 는 각각 s편광, p편광 성분을 나타내고, α_{eq} 는 다음과 같이 주어진다.

$$\cos \alpha_{eq} = (\cos \phi \cos \theta \cos \alpha - \sin \phi \sin \theta) / \sin \gamma \quad (3)$$

유효 방위각 α_{eq} 는 복굴절 필터의 파장에 따른 투과 특성에 영향을 미치는데 α_{eq} 가 45° 또는 135° 범위내에 있을 때 중심파장과 중심파장이 아닌 파장에서의 투과 대비 특성이 좋아진다. 그런데 유효 방위각 α_{eq} 는 방위각 α 의 함수이므로 복굴절 필터의 중심 파장을 바꾸기 위해 방위각을 바꾸어 주면 α_{eq} 는 변하게 된다. α_{eq} 가 45° 또는 135°에서 벗어나면 날수록 투과 대비 특성은 나빠지는데 위 각에서 $\pm 3^\circ$ 벗어나면 투과 대비 특성이 약 10% 나빠진다. 이를 허용한계로 간주하면 방위각 α 의 유효 범위는 유효방위각 α_{eq} 가 $45^\circ \pm 3^\circ$ 또는 $135^\circ \pm 3^\circ$ 범위내에 있어야 한다는 조건에서 정해지며 유효 방위각 범위내에서 방위각이 변할 때 식 (1)의 f_b 가 많이 변할 수 있도록 하면 필터의 중심 파장의 가변폭이 크게 된다. 또한 필터의 중심파장 가변폭이 크면 차수를 바꾸면서 사용할 수 있는 장점이 있다. Naganuma 등^[33]은 파장이 0.5-2.0 μm 인 영역에서 quartz 복굴절 필터의 최적 dive-angle θ 는 65.9°에서 66.2°로 파장에 따른 변화가 거의 없으므로 최적 dive-angle 이 파장에 관계 없이 66°라고 간주해도 됨을 보여 주었다. 원하는 중심 파장의 복굴절 필터를 제작하기 위해서는 필터의 두께를 결정하기만 하면 된다. 필터의 두께는 복굴절 필터의 차수(order)에 비례하며, 차수가 너무 크면 필터의 밴드 폭이 감소하며 복굴절에 의한 walk-off 현상으로 빛이 갈라질 수 있다. 차수가 N ($\psi = 2N\pi$)인 필터의 두께는

$$L = \frac{2N \pi \cos \phi}{f_b^c k \delta} \quad (4)$$

에 의해 정할 수 있다. 여기서 f_b^c 는

$$f_b^c = [n^2 \sec^2(132^\circ) + 1]^{-1} \quad (5)$$

이다. 중심 파장이 0.85 μm , 차수가 2인 복굴절 필터의 최적 두께는 약 1.01 mm이다.

III. 실험

본 연구에 사용한 Cr:LiSAF 레이저 결정은 Lightning Opt-

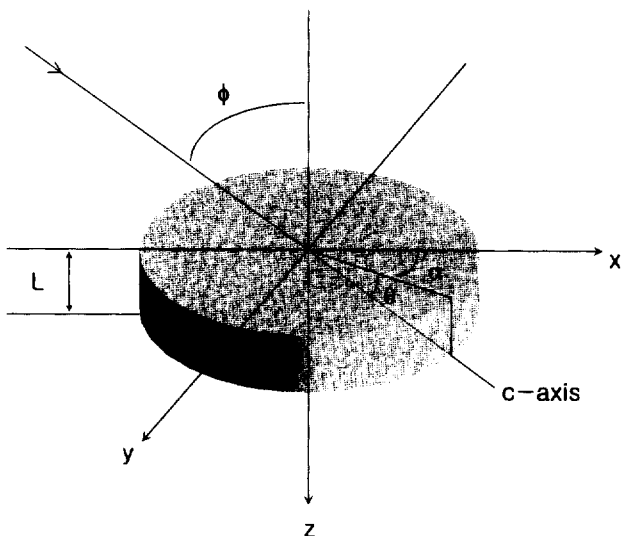


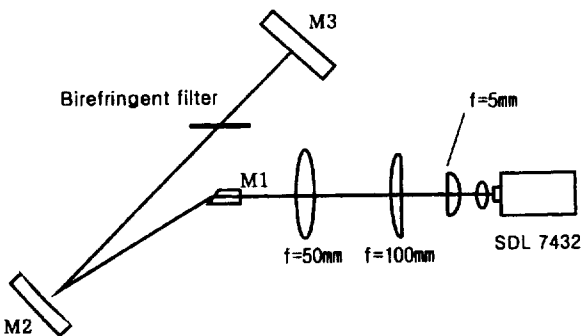
그림 1. 복굴절 필터에서 dive-angle θ 및 방위각 α

ical Corporation에서 구입한 것으로 Cr^{3+} 이온의 농도가 3%이고, 670 nm에서의 흡수 계수는 4.3 cm^{-1} 이다. 그리고, Cr:LiSAF 결정은 단축 결정으로 굴절률은 편광에 따라 굴절률이 다르다. 편광이 c 축에 나란할 때의 굴절률을 n_c 라고하고, c 축과 수직일때의 굴절률을 n_a 라고 한다면 n_c, n_a 는 다음과 같이 주어진다.^[34]

$$n_c^2 = 1.98488 + \frac{0.00235}{\lambda^2 - 0.10936} - 0.01057\lambda^2 \quad (6)$$

$$n_a^2 = 1.97673 + \frac{0.00309}{\lambda^2 - 0.00935} - 0.00828\lambda^2 \quad (7)$$

여기서 파장의 단위는 micron이고, 850 nm에서의 n_c 는 1.4074, Brewster각은 54.6° 이다. 열팽창계수는 $\alpha_c = -10.0 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $\alpha_a = 18.8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 이다.^[34] 결정의 모양은 plano-Brewster이며, 중심축의 길이가 3 mm 이었다. 결정의 plane 면은 800-900 nm 대역에서 고반사, 550-700 nm 대역에서 고투과 특성을 갖도록 코팅된 것을 구입하였다. 결정은 자체 설계한 결정 홀더에 인듐 포일을 써서 장착하였다. 광 펌핑을 하기 위한 반도체 레이저로는 Spectra-Diode Lab 의 SDL 7432-H 1을 사용하였다.이것은 발진 파장이 674 nm이고, 최대 출력은 500 mW, 출력 면의 크기는 $250 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ 였다. 반도체 레이저의 파장은 온도의 함수로서 온도를 조절하면 파장을 3-4 nm정도는 조절할 수 있다. 만일 반도체 레이저의 온도가 주위의 온도보다 낮을 경우에는 레이저 다이오드의 출력 창에 이슬이 만들어져서 레이저 빔을 산란 시킬 수 있으므로 주의 하여야 한다. 실험 장치도는 그림 2와 같다. 반도체 레이저로 부터 나온 빔은 Melles Griot 사의 GLC009 평행광렌즈(NA=0.6, f=8 mm)에 의해 LD의 접합면에 수직인 방향으로 평행광이 되도록 한다음 초점거리 5 mm, 100 mm의 실린더형 렌즈에 의해 접합면에 나란한 방향으로 빔을 확대 하였는데 그 이유는 집속 렌즈에 의해 빔을 집속하였을 때, 작은 크기의 빔을 얻기 위해서이다. 집속 렌즈는 초점거리 50 mm인 것을 사용하였다. 공진기는 Cr:LiSAF 결정의 평면과 곡률반경이 100 mm, 800-900 nm 대역에서 고반사로 코팅된 오목거울, 800-900 nm에서 투과율이 1% 인 평면으로된 출력경으로 이루어진 V 형 공진기를 구성하고 있다. 레이저 빔이 결정을 통과할 때 생기는 비점수차를 보정하기위해 공



Experimental setup.

그림 2. Cr:LiSAF 레이저의 개략도. M1, M3 : 평면 거울, M2: 오목거울, 곡률반경 10 cm

진기를 접힌구조로 설계하였다. 이때 공진기의 접힌 각도는 13° 가 되도록 하였다. 공진기를 더욱 안정하게 하기 위해 두꺼운 알루미늄 블록위에 집속렌즈와 공진기를 장착 하였다. 레이저의 발진 파장은 분광계(SPEX사,모델1704)를 사용하여 측정하였다.

IV. 결과 및 논의

반도체 레이저의 출력에 대한 Cr:LiSAF 레이저의 출력은 그림 3과 같다. 사용한 펌프용 반도체 레이저는 674 nm에서 500 mW의 출력을 낼 수 있는 SDL7432-H1 이었다. 출력경의 투과율이 0.5% 인 경우, 펌핑 출력이 390 mW일 때 10 mW의 근적외선 출력을 얻었으며, 경사 효율은 3.45% 이었다. 출력경의 투과율이 1% 인 경우, 펌핑출력이 290 mW 일 때 Cr:LiSAF레이저의 출력은 19.4 mW 였고, 경사효율은 13.5% 였다. 경사효율이 낮은 이유는 펌핑레이저로 사용한 반도체 레이저의 출력면의 크기가 $250 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ 로 너무 커서 이를 광학계로 결정내에 작은 영상을 맺게 할때 한계가 있기 때문이다. 실제 발진하는 모드의 크기는 $30-60 \mu\text{m}$ 이므로 많은 펌핑 에너지가 레이저를 발진시키는데 이용되지 못하고 결정내에 열을 집적시키는 역할을 한다. 결정내에 누적된 열은 여기 상태의 원자가 다시 레이저 빛을 흡수하게 하거나 여기 상태의 수명을 줄여주는 효과가 있어 이득의 감소 즉 손실의 증가로 나타나게 된다.^[11] 그림 3에서 펌핑 출력이 클 때 레이저 출력이 급격히 떨어지는 원인은 바로 이와 같은 열에 의한 흡수의 증가 때문인 것으로 여겨진다.^[12] 레이저의 출력을 높이고, 열에 의한 효과를 최소화 하기 위해서는 집속된 펌핑레이저 빔의 크기가 발진하는 레이저의 모드보다 작은 것이 유리한데, 이를 위해서는 펌프레이저의 출력 단면이 작은 것을 사용하는 것이 필요하다.

Cr:LiSAF 레이저의 파장 가변 성질을 연구하기 위하여 복굴절 필터를 공진기내에 Brewster 각으로 설치하고 레이저의 파장 및 출력을 측정하였다. 복굴절 필터는 두께가 1.01 mm, dive-angle 이 66° 인 것을 사용하였다, 그림 4는 레이저 발진

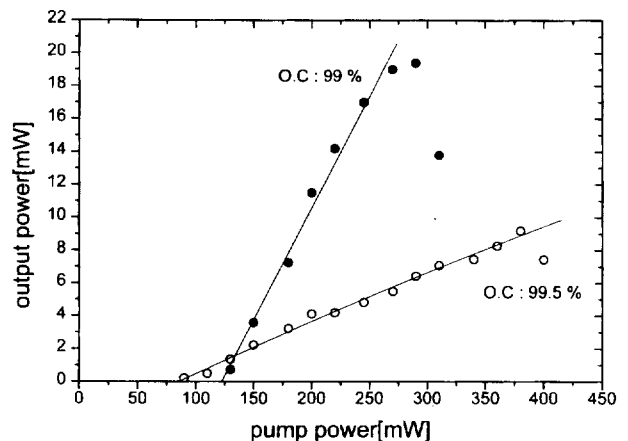


그림 3. 펌프 레이저의 출력에 대한 Cr:LiSAF 레이저의 출력, O.C. 출력경의 투과율

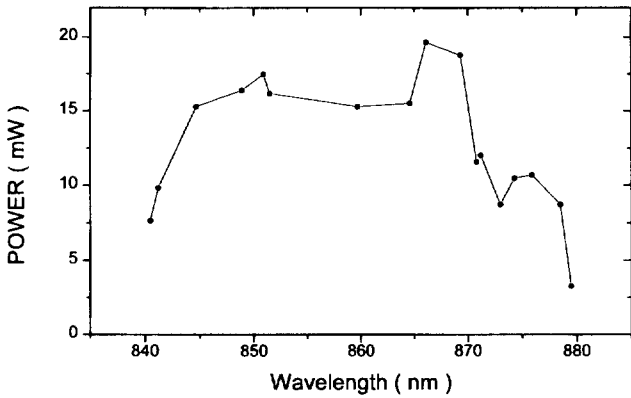


그림 4. 복굴절 필터로 파장을 가변하였을때 발진파장에 따른 레이저 출력

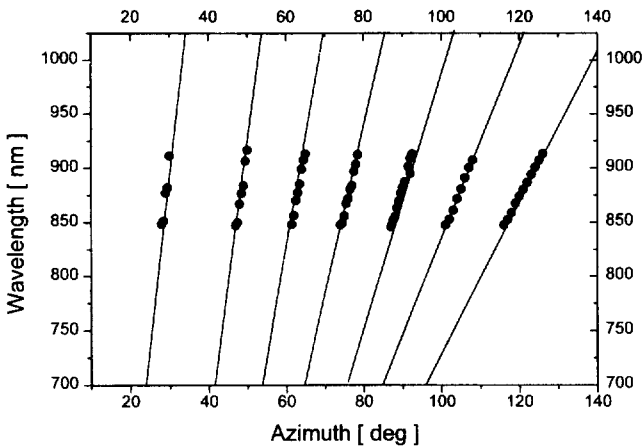


그림 5. 복굴절 필터의 방위각 변화에 대한 발진 파장의 변화. 점: 실험, 실선: 위상차가 $2\pi, 4\pi, \dots, 14\pi$ 일때 이론값

파장에 따른 출력의 변화를 보여 준다. 840 nm 에서 880 nm 까지 레이저 파장을 바꿀 수 있음을 볼 수 있다. 파장에 따라 출력의 변화가 심한 이유는 복굴절 필터를 회전시킴에 따라 광학계의 정렬이 달라지거나 펌프 영역이 커서 서로 다른 횡모드로 발진하기 때문인 것으로 여겨진다. 단면적이 작은 레이저로 펌핑할 경우 이러한 효과가 감소할 것이라 예측된다. 그림 5는 복굴절 필터의 방위각과 레이저 파장과의 관계를 보여 준다. 이 그림에서 실선은 식 (1)로 부터 구한 것이고, 점들은 측정치이다. 복굴절 필터의 설계 차수는 2 (위상차 4π)이지만 방위각을 바꿔 줌으로써 차수를 바꿀 수 있음을 볼 수 있다. Naganuma 등^[33]이 설정한 허용한계($132^\circ \leq \alpha_{eg} \leq 138^\circ$)에 들어가는 것은 위상차가 $4\pi, 6\pi, 8\pi$ 일때이지만 허용한계를 낮추면 다른 차수도 사용 가능하다. 또한 복굴절 필터의 대역폭은 차수에 반비례 하므로 방위각 영역을 바꿈으로써 필터의 대역폭을 바꿀 수 있다.

V. 결 론

고출력 적색 반도체 레이저에 의해 펌핑되는 Cr:LiSAF 레이저를 제작하였다. 레이저 결정은 plano-Brewster 모양의

Cr:LiSAF 으로 Cr^{3+} 의 농도가 3%, 길이가 3 mm, 결정의 평면인 면은 펌플레이저를 최대로 투과하고, 800-880 nm 대역에서 최대 반사율을 갖도록 코팅된 것을 사용하였다. 결정에 의한 비점수차를 보정하기 위해 V 자형 공진기를 사용하였다. 펌플레이저의 출력이 290 mW일때, Cr:LiSAF 레이저의 출력은 19.4 mW이었다. dive-angle 이 66° 인 복굴절 필터를 사용하여 레이저 파장을 840-880 nm 대역내에서 변화시킬 수 있었다. 복굴절 필터의 방위각에 따른 발진 파장을 측정하여 이론과 비교한 결과 잘 일치하였다.

참 고 문 헌

- [1] S. A. Payne, L. L. Chase, L. K. Smith, W. L. Kway, and H. W. Newkirk, *J. Appl. Phys.* **66**, 1051(1989).
- [2] S. C. W. Hyde, N. P. Barry, R. Mellish, P. M. W. French, J. R. Taylor, C. J. van der Poel, and A. Valster, *Optics Lett.*, **20**, 160(1995).
- [3] A. Miller, P. LiKamWa, B. H. T. Chai, and E. W. Van Stryland, *Optics Lett.*, **17**, 195(1992).
- [4] P. LiKamWa, B. H. T. Chai, A. Miller, *Optics Lett.*, **17**, 1438(1992).
- [5] J. R. Lincoln, M. J. P. Dymott, and A. I. Ferguson, *Optics Lett.*, **19**, 1210(1994).
- [6] M. Stalder, B. H. T. Chai, and M. Bass, *Appl. Phys. Lett.*, **58**, 216(1991).
- [7] I. Zawischa and A. I. Ferguson, *Optics Lett.*, **21**, 45(1996).
- [8] D. Kopf, J. Aus der Au, U. Keller, G. L. Bona, and P. Roentgen, *Optics Lett.*, **20**, 1782(1995).
- [9] M. J. P. Dymott, and A. I. Ferguson, *Optics Lett.*, **20**, 1157(1995).
- [10] V. P. Yanovsky, F. W. Wise, a. Cassanho, and H. P. Jenssen, *Optics Lett.*, **20**, 1304(1995).
- [11] F. Falcoz, F. Balembois, P. Georges, A. Brun, and D. Rytz, *Optics Lett.*, **20**, 1274(1995).
- [12] D. Kopf, K. J. Weingarten, L. R. Brovelli, M. Kamp, and U. Keller, *Optics Lett.*, **19**, 2143(1994).
- [13] M. J. P. Dymott, and A. I. Ferguson, *Optics Lett.*, **19**, 1988(1994).
- [14] N. H. Rizvi, P. M. W. French, J. R. Taylor, P. J. Delfyett, and L. T. Florez, *Optics Lett.*, **18**, 983(1993).
- [15] F. Balembois, F., P. Georges, and A. Brun, *Optics Lett.*, **18**, 1730(1993).
- [16] P. M. W. French, R. Mellish, J. R. Taylor, P. J. Delfyett, and L. T. Florez, *Optics Lett.*, **18**, 1934(1993).
- [17] Q. Zhang, G. J. Dixon, B. H. T. Chai, and P. N. Kean, *Optics Lett.*, **17**, 43(1992).
- [18] R. Scheps, J. F. Myers, H. B. Serreze, A. Rosenberg, R. C. Morris, and M. Long, *Optics Lett.*, **16**, 820(1991).
- [19] H. H. Zenzie, A. Finch, and P. F. Moulton, *Optics Lett.*, **20**, 2207(1995).
- [20] P. Beaud, M. Richardson, E. J. Miesak, and B. H. T. Chai, *Optics Lett.*, **18**, 1550(1993).
- [21] T. Ditmire, H. Nguyen, and M. D. Perry, *J. Opt. Soc. Am. B.* **11**, 580(1994).

- [22] T. Ditmire, H. Nguyen, and M. D. Perry, *Optics Lett.*, **20**, 1142(1995).
- [23] P. Beaud, M. Richardson, and E. J. Miesak, *IEEE J. Quantum Electron.*, **31**, 317(1995).
- [24] Zawischa and A.I. Ferguson, *Optics Lett*, vol. **21**, 45(1996).
- [25] T. Sorokina, E. Sorokin, and E. Wintner, *Optics Lett*, vol. **21**, 204(1996).
- [26] D. Burns, M. P. Critten, and W. Sibbett, *Optics Lett*, vol. **21**, 477(1996).
- [27] F. Falcoz, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, and A. Brun, *Optics Lett*, vol. **21**, 1253(1996).
- [28] N. J. Vasa, T. Okada, and M. Maeda, *Optics Lett*, vol. **21**, 1472(1996).
- [29] L. K. Smith, S. A. Payne, W. L. Kway, L. L. Chase, and B. H. T. Chai, *IEEE J. Quantum Electron.*, **28**, 2612(1992).
- [30] B. Lyot, *Comput. Rend. Acad. Sci.*, vol. **197**, 1593(1933).
- [31] A. L. Bloom (1974), *J. Opt. Soc. Amer.*, vol. **64**, 447(1974).
- [32] G. Holtom and O. Teschke, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-10, pp. 577(1974).
- [33] K. Naganuma, G. Lenz and E. P. Ippen, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol **28**, 2142(1992).
- [34] M. D. Perry, S. A. Payne, T. Ditmire, R. Beach, G. L. Quarles, W. Ignatuk, R. Olson, and J. Weston, *Laser Focus World*, Sept, 85(1993).

The CW Lasing Characteristics of a Cr:LiSAF Laser Pumped by Semiconductor Lasers

Jang-Han Yoon, Jong-Dae Park, and Chang-Ho Cho
Department of Physics, Pai-Chai University, Taejeon 302-735, Korea

Jai-Hyung Lee and Joon-Sung Chang
Department. of Physics, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

(Received: November 19, 1996)

A Cr:LiSAF laser pumped by semiconductor lasers was constructed. The pumping laser was a high-power semiconductor laser (SDL 7432-H1) of wavelength 674 nm and maximum power of 500 mW. The laser crystal was a Cr:LiSAF of plano-Brewster shape with 3% Cr³⁺-ion concentration and 3 mm in length. The plane facet of the crystal was coated to get the maximum transmittance of pumping laser and maximum reflection over the 800 - 880 nm bandwidth. V-shaped resonator was used to compensate the astigmatism induced by the crystal. The output power of the Cr:LiSAF laser was 19.4 mW at the pumping power of 290 mW. The wavelength was tuned by a steep dive-angled birefringent filter from 840 nm to 880 nm and the characteristics of the filter were agreed well with a theory.