

## 다이오드 여기 Nd:YVO<sub>4</sub> 단일모드 녹색광 레이저의 출력 특성 연구

이용우 · 이종훈<sup>†</sup>

영남대학교 광전자 물리학과

Ⓣ 712-749 경북 경산시 대동 214-1

(2003년 2월 5일 받음, 2003년 4월 21일 수정본 받음)

최대 1.9 W의 레이저 다이오드 출력을 Nd:YVO<sub>4</sub> 결정 단면에 집속시키고 공진기 내부에 KTP 결정을 두어서 제2고조파 변환시켜 녹색광(532 nm) 레이저를 발생시켰다. 다이오드 레이저 스펙트럼과 레이저 결정의 흡수 스펙트럼을 비교하여 최적의 다이오드 작동 온도를 찾았다. 공진기 길이와 출력경의 곡률을 변화시키면서 출력의 변화를 관측한 결과, 최대 80 mW의 녹색광 레이저 출력을 얻었으며 최대 출력을 내는 공진기 조건에서는 집속된 여기광의 직경과 TEM<sub>00</sub> 모드의 직경이 일치함을 알았다. 발생된 녹색광 레이저는 다중모드로 발진하였으며 출력 요동이 심하였다. 단일모드 발진을 시키기 위하여 브루스터 판과 에탈론 등을 사용하는 여러 가지 형태의 공진기를 시도하여 보았다. 실험 결과, 에탈론을 사용한 공진기에서 가장 큰 출력인 60 mW의 단일 종모드 출력을 얻었다. 단일모드로 발진하는 레이저의 출력 요동은 다중 모드에 비하여 1/10 이하로 감소하였다.

주제어 : Diode pumped solid state laser, single mode laser, green laser, etalon, birefringent filter.

### I. 서 론

레이저 다이오드(LD)는 선평등에 비하여 수명이 길고 크기가 작으면서도 발생된 빛의 선평도 아주 좁아서 고체레이저를 여기하는데 매우 적합하며 특히, 크기가 작은 저출력 레이저 여기에 유리하다.<sup>[1]</sup> 이 같은 저출력 레이저 발진에서는 공간모드 특성을 좋게 하고 여기 효율을 올리기 위하여 단면여기 방식(2-4)을 주로 사용한다. 특히, 출력이 수백 mW 이하인 레이저의 경우, 출력이 1~4 W인 단일 발광면을 가진 다이오드로 여기하면 여러 개의 발광면을 가진 다이오드로 여기할 때 필요한 렌즈수송관, 프리즘 빔성형기, 광섬유 다발 대신에 간단한 구조의 집속 광학계만 사용하여도 수백 이내의 좁은 면적에 집속이 가능하므로 구조가 간단해진다. 단면여기 방법에서는 공진기의 TEM<sub>00</sub> 모드 영역과 여기영역을 공간적으로 일치시키기가 용이하므로 여기빔의 에너지를 발산각이 작은 TEM<sub>00</sub> 모드의 발진에 대부분 사용할 수 있어 고품질의 레이저빔을 고효율로 얻을 수 있다.

단일모드 녹색광 레이저는 Nd:YAG 등의 매질을 사용하는 적외선 레이저를 제2고조파 변환시켜 발생시키며, 홀로그래프, 간섭계, 정밀 측정기 등의 응용분야에서 매우 중요하다. LD로 여기하는 단일모드 녹색광 레이저의 발진 방법으로는 여러 가지가 고안되어 왔다. 먼저 공진기 내부에 얇은 판을 브루스터(Brewster) 각으로 두어서 편광시키고 이것을 복굴절 특성을 가진 KTP 결정과 결합시켜 복굴절 필터 기능을 하게 하는 방법<sup>[5-7]</sup>이 있다. 비슷한 방법으로, Nd:YVO<sub>4</sub> 결정의 경우 Nd:YAG 결정과는 달리 유도 방출 단면적이 편광 방향에 따라 달라서 편광된 레이저가 나오는 특성을 이용하여 복굴절

필터가 없이 KTP와 Nd:YVO<sub>4</sub>만 사용하여 단일모드 발진을 이루기도 한다.<sup>[8-10]</sup> 이들 방법에서는 복굴절 필터의 최대 투과 파장을 공진기의 종모드에 일치시키며, 최대 3.2 W의 안정된 단일 종모드 출력을 얻었다.<sup>[9]</sup> 이러한 방법은 공진기의 구조가 간단한 장점이 있어 최근 연구가 많이 진행되었다.

에탈론은 레이저의 선평을 줄이는데 자주 이용되고 있는 소자이다. 공진기의 Nd:YVO<sub>4</sub> 결정이나 KTP 결정 양면에서의 반사를 이용하여, 결정 자체가 에탈론의 기능을 수행하게 하므로써 단일모드를 발진시키는 방법도 활발히 연구되었다.<sup>[11]</sup> 공진기 내부에 별도의 에탈론을 두어서 단일모드만 선택하는 방법은<sup>[12]</sup> 제2고조파 변조과정에서의 녹색 잡음 연구에 사용된 뒤<sup>[13]</sup> 거의 사용되지 않았다. 장치가 보다 복잡하고 제어가 필요한 점 때문이었다. 또 다른 비슷한 방법으로, 공진기의 내부에 별도의 거울을 두어서 출력경의 역할과 함께 에탈론의 기능을 동시에 수행하도록 하고, 거울사이에 KTP를 두어서 고효율로 제2고조파를 발생시키는 결합공진기 방법도 고안되었다.<sup>[14]</sup> 이 때, 공진기 내에 2개의 자유대역폭이 다른 에탈론이 존재하는 것이 되어서 유효 자유대역폭은 이들 자유대역폭 값의 공배수만큼 늘어나면서도 피네스(finesse)는 증가하게 된다. 이 방법도 간단한 공진기 구조로 단일모드를 얻는다는 것이 장점이었다.

우리는 지금까지 개발된 대표적인 방법인 복굴절 필터를 사용하는 방법과 에탈론을 사용하는 방법을 시험해보고 그 결과를 비교해 보았다. 또한 레이저 출력이 요동하는 정도를 측정하고 그 원인을 규명하였다. 레이저 결정은 Nd:YVO<sub>4</sub>를 사용하였다. 이 결정은 유도 방출 단면적이  $15.9 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ 로 Nd:YAG에 비하여 5배나 더 커서 레이저 발진 문턱이 매우 낮고, 또한 최대 기울기 효율(slope efficiency)이 76%로 매우 높으며 809 nm에서의 흡수단면적이  $2.9 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ 로 808

<sup>†</sup>E-mail: jhyi@yu.ac.kr

nm 파장에서의 Nd:YAG 흡수 단면적에 비하여 7배나 더 크다.<sup>[2]</sup> 809 nm에서의 흡수 피크의 경우 스펙트럼 폭이 3 nm로 Nd:YAG의 2 nm 보다 넓어서 LD의 파장 변화에 덜 민감한 장점이 있다.

**II. 실험 결과 및 논의**

제작된 레이저의 구조도는 그림 1과 같다. 레이저 여기에 사용한 LD(SDL-2300)는 단일 발광면을 가졌으며, 발광면의 면적은 200×1 μm<sup>2</sup>이다(발산각은 발광면의 장축으로 12도, 수직 방향으로 32도). LD는 최대 전류 2.0 A 이하에서 구동하였으며, 최대 전류에서 출력은 1.9 W이었다. 렌즈로만 구성된 집속광학계를 사용하여 LD를 Nd:YVO<sub>4</sub> 결정(Casix product)의 단면에 강하게 집속시켰다. LD가 부착된 몸체는 열전(TE: thermoelectric) 냉각기에 의하여 일정한 온도로 유지되도록 조절되며 구리재질의 냉각용 몸체와 연결되어 있다. 구리 몸체는 하단의 구리판에 열전도 에폭시로 부착시켰다. 상단의 구리판은 하단의 구리판과 2장의 4×4 cm<sup>2</sup> 크기의 TE 냉각기로 연결되어 있어 온도가 신속하게 제어되도록 하였다.

Nd:YVO<sub>4</sub> 결정은 단면이 3×3 mm<sup>2</sup>, 길이가 2 mm이며(a-cut), 다이오드 레이저빔이 입사하는 면의 표면에는 808 nm 파장에서 무반사가 되고 1064 nm와 532 nm에서 고반사가 되도록 유전체 코팅을 입혔다. Nd의 농도는 1.1 at.%이며, 결정은 인디움 포일로 감쌌다. 이 결정은 LD의 온도를 조절하는 구리블록에 함께 부착시켰다. 이러한 구조에서는 LD의 입사각, 위치, 레이저 결정의 기울기 조절이 불가능하다. 따라서 광학 마운트를 정밀하게 가공하여 조절이 필요 없도록 하였다. LD와 결정의 위치가 완전히 고정되고, 냉각용 몸체에 먼지가 유입되지 못하게 완전히 감싸져 있어 안정성은 훨씬 증가한다. LD의 중심 파장뿐만 아니라 스펙트럼도 온도에 의존한다.

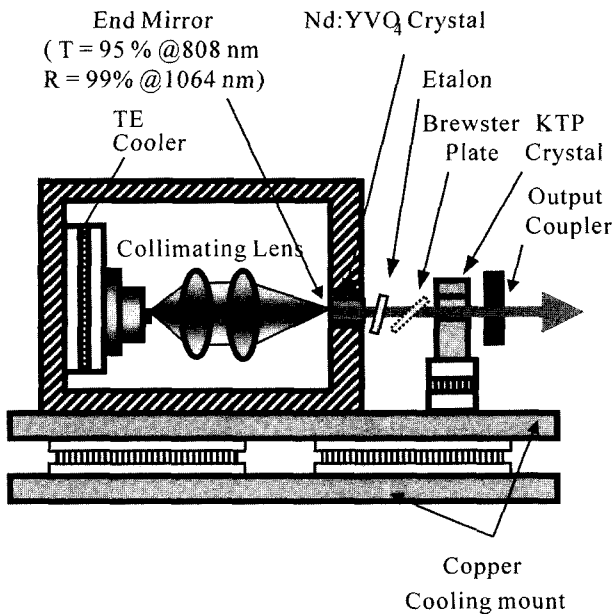


그림 1. 다이오드 여기 단일모드 녹색광 레이저의 구조도.

LD의 온도를 20°C와 24, 28, 32°C로 바꾼 다음, 각 온도에서 전류를 2 A까지 변화시키면서 LD의 스펙트럼 변화를 기록하였다. 또한, 각 온도에서 Nd:YVO<sub>4</sub>를 통과한 다음의 흡수 스펙트럼과 출력도 기록하였다. 그림 2(a)에 LD 온도가 20°C인 때의 구동 전류에 따른 스펙트럼 변화를 나타내었다. LD는 낮은 전류에서는 803.5 nm에서만 약 1 nm의 선폭을 갖고 발진하다가, 구동 전류가 1.2 A 이상 상승하면 807.0~807.5 nm에서 또 다른 피크가 나와서 전체 파장폭은 약 1.8 nm로 넓어진다. 그러나 최대 구동 전류인 2.0 A에서는 다시 808.5 nm의 피크가 대부분의 에너지를 가지고 선폭도 1 nm으로 축소된다. 이 스펙트럼은 Nd:YVO<sub>4</sub> 결정을 지나면서 흡수되어 그림 2(b)와 같이 변화하였다. 808.5 nm 파장을 가진 광자는 흡수 피크와 잘 일치하여 그림 2(b)에 보듯 거의 다 결정에 흡수되나, 804.5 nm 위치에서의 LD는 흡수가 잘 되지 않는다. 비교를 위하여 그림 2(b)에 점선으로 농도 1.5 at%의 Nd:YVO<sub>4</sub> 결정의 흡수 계수 그래프를 표시하였다. 이 결과로부터 LD의 중심 파장 뿐만 아니라, 스펙트럼 구조도 온도에 의존하며, 최고 전류값인 2.0 A에서 Nd:YVO<sub>4</sub> 결정의 흡수 피크와 일치하는 스펙트럼을 갖게 하는 온도를 찾아야 함을 알았다.

최적 온도를 찾기 위하여 Nd:YVO<sub>4</sub> 결정을 투과한 LD의 출력을 각 구동 전류값에 대하여 측정하였으며 그 결과는 그

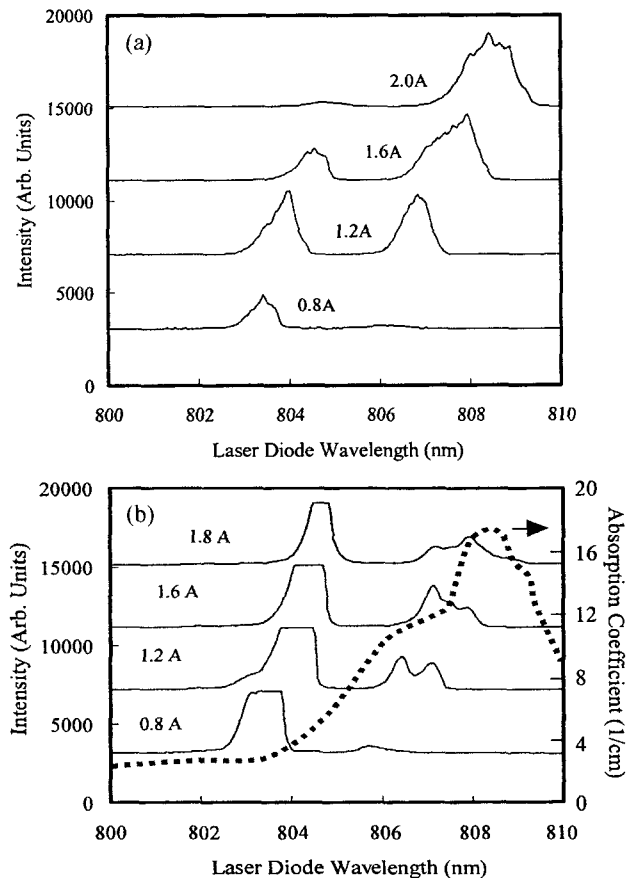


그림 2. (a) 온도가 20°C인 때 전류에 따른 레이저 다이오드 스펙트럼의 변화. (b) 온도가 20°C인 때 레이저 다이오드가 Nd:YVO<sub>4</sub>결정을 투과한 후의 흡수 스펙트럼.

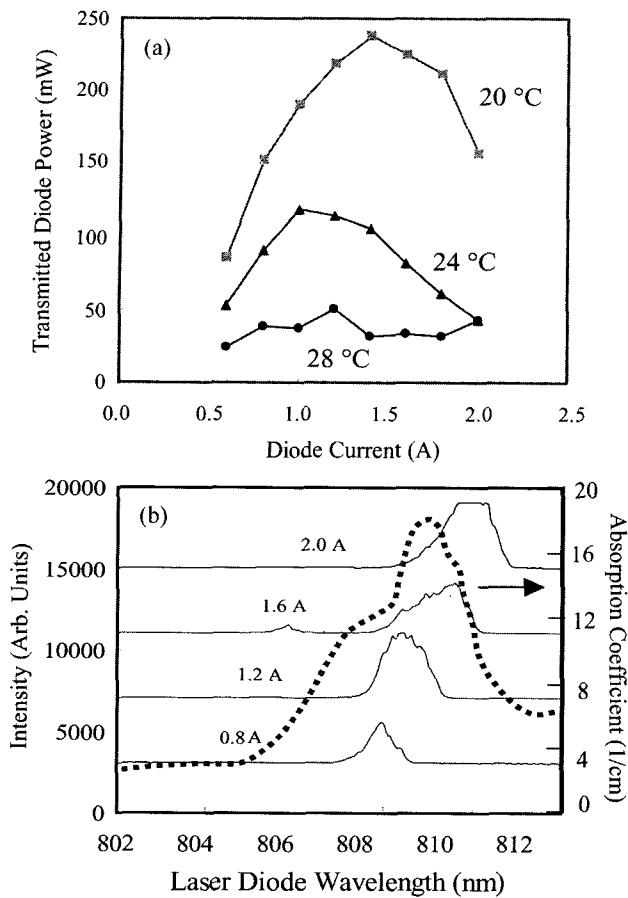


그림 3. (a) 레이저 다이오드의 온도와 구동 전류를 변화시키며 측정된 Nd:YVO<sub>4</sub> 결정을 투과한 레이저 다이오드의 출력. (b) 온도가 28°C인 때, 전류에 따른 레이저 다이오드의 스펙트럼변화.

림 3(a)에 나와있다. 그림에서 LD의 온도가 20°C와 24°C인 때는 전류가 증가하면서 투과광도 점차 증가하다가, 전류가 어느 값 이상이 되면 오히려 흡수율이 증가하여 투과광의 세기가 감소함을 보인다. 이는 LD에서 나오는 에너지가 두 개의 피크로 갈라져 있다가 구동 전류에 따라 에너지의 상대적 비가 변화하기 때문이다. 그러나 LD의 온도가 28°C인 때는 구동 전류에 따른 변화가 거의 없다. 그 원인은 그림 3(b)에 타낸, 온도가 28°C인 때의 LD의 스펙트럼을 보면 알 수 있다. 이 때는 거의 모든 구동 전류에서 단일 피크에 에너지가 모여 있으며, 중심파장이 808.5 nm이고 LD의 선폭도 1 nm이어서 흡수가 매우 잘 된다. 온도가 32°C로 더 상승하면 단일 피크를 보이기는 하나 중심 파장은 810.5 nm이 되어서 흡수가 잘 안된다. 이상의 결과로부터 전체 구동 전류에 걸쳐 최적의 파장을 내는 LD의 온도는 28°C임을 알 수 있다. 한편 온도를 변화시켜도 스펙트럼과 달리 LD의 출력은 거의 변화가 없었다.

Nd:YVO<sub>4</sub> 결정은, LD의 편광 방향이 결정의 광축과 수직한지 평행한지에 따라서 흡수 단면적이 다르고, 기본파에 있어서도 유도방출 단면적이 편광에 따라 다르다. 여기 LD의 편광은 지면에 수평 하게 편광되도록 하였다. 레이저 결정의 방

향을 90도로 변화시키면서 흡수 효율과 레이저 발진 효율을 조사한 결과, LD의 흡수계수는 결정축의 방향에 영향을 받았으나, 발진하는 적외선 레이저의 편광은 항상 결정의 축을 따랐다. 발진되는 레이저는 98% 이상 편광되어 있었다. LD의 편광과 기본파 레이저(1064 nm)의 편광이 일치할 때, LD는 98% 가까이 흡수되었으나, 편광이 90도 변화하면 LD는 60% 정도만 흡수되고 최대 전류에서 532 nm 레이저의 출력도 1/4 이하로 현저히 감소함을 관측하였다. 기본파로 발진하는 레이저의 주파수를 공진기 내부에서 배가시킬 때, 비선형 결정(KTP)의 온도가 변화하면 결정내부에서의 위상정합 조건이 변화한다. 또한, 복굴절 특성을 지닌 KTP를 지나면서 레이저의 편광상태가 Nd:YVO<sub>4</sub>의 광축과 평행하게 바뀌게 되어야 손실이 작는데, 길이의 변화로 인하여 타원 편광이 되면 출력의 변동이 발생한다. 따라서 이 결정의 온도를 0.1°C 이내로 안정화시키기 위하여 별도의 TE 냉각기를 사용하였다. 사용한 KTP는 type-II이었으며(크기는 5×5×5 mm<sup>3</sup>), 발생한 녹색광의 편광은 지면에 대하여 45도의 각을 가졌다.

공진기의 길이는 기본파의 모드 직경에 영향을 미친다. 실험에서 레이저의 공진기 길이를 45 mm와 65 mm 두 가지로 변경시켜가며 출력을 측정하였다. 출력경의 한쪽 면에는 1064 nm 파장에서 99% 이상 반사가 되고 532 nm에서 95% 이상 투과가 되도록 코팅하였으며, 반대편 면에는 532 nm에서 무반사가 되도록 코팅하였다. 출력경의 곡률 또한 50, 100, 200 mm로 변화시키면서 출력의 변동을 기록하였다. 측정 결과 공진기 출력경의 곡률이 100 mm인 때 80 mW의 가장 큰 출력을 보였다.

공진기 내의 TEM<sub>00</sub> 모드 직경을 계산하면 레이저 결정 위치에서, TEM<sub>00</sub> 모드의 빔 직경은 214 μm 정도이다. LD의 발광면 크기가 이 정도이므로, 이것이 레이저 결정에 비슷한 크기로 결상된다면, LD 집속 빔의 직경과 거의 일치하여 이 상태에서의 LD 에너지 전달 조건이 가장 좋아진 결과로 가장 큰 출력이 나온 것으로 생각된다. 곡률이 50 mm인 때는 계산된 모드 반경이 120 μm로 너무 작아서 출력이 반으로 감소하였으며 공진기의 거리 변화에 출력이 민감하게 변화하였다. 곡률이 200 mm인 때는 100 mm인 때에 비하여 모드 반경은 조금 더 증가한 정도이어서 최대 출력은 약 4% 정도 감소하는데 그쳤으며, 곡률이 100 mm인 때와 200 mm인 때는 공진기의 길이를 45 mm에서 65 mm로 변화시켜도 출력 변화는 거의 없었다. 공진기의 길이를 축소시키면 종모드 간격이 줄어들지만, 내부에 들어가는 부품이 차지하는 공간으로 인하여 공진기 길이를 45 mm이하로 줄이기는 어려웠다.

이 공진기에서는 LD가 매우 좁은 영역에 집속되므로 국부적으로 열렌즈 효과가 생길 수 있다. 열렌즈 효과가 발생하면 TEM<sub>00</sub> 모드의 직경이 달라진다. Nd:YVO<sub>4</sub> 결정에서의 열렌즈 효과로 인한 초점 거리는 표면에서의 효과를 무시한다면 다음의 식에서 구할 수 있다.<sup>[1]</sup>

$$f \approx \frac{2KA}{P_a} \left( \frac{dn}{dT} \right)^{-1} \quad (1)$$

위 식에서 K는 열전도도, A는 결정의 단면적, P<sub>a</sub>는 결정에

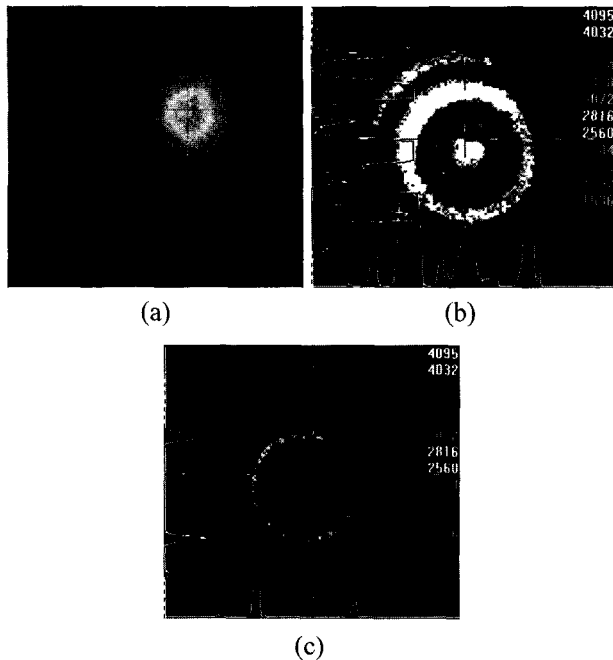


그림 4. (a) 제2고조파 출력의 공간적 세기 분포를 CCD 카메라로 기록한 영상. (b) 자유대역폭(FSR)이 20 GHz인 고체 에탈론(R=96%)으로 기록한 다중모드 레이저의 간섭 무늬. (c) 자유대역폭(FSR)이 20 GHz인 고체 에탈론(R=96%)으로 기록한 단일모드 레이저의 간섭 무늬.

서 방출되는 열이다. 열렌즈 효과를 계산하기 위해서는 결정에서 LD가 집속되는 단면적을 정확히 측정하여야 한다. 그러나 렌즈에서 레이저 결정사이의 거리가 너무 가까워서 CCD를 이용한 측정이 곤란하였다. 매우 빠른 렌즈에 의하여 LD가 집속되므로 결정 내부에서 집속 단면적이 변화한다. 따라서 레이저 결정에 He-Ne 레이저를 통과시켜 열렌즈를 직접 측정하여 평균적인 효과를 관측하려 하였으나, 이 방법은 구조상 적용하기가 곤란하므로 반사방식으로 측정할 방법을 고안하고 있다. 열렌즈가 10 cm 이내로 아주 짧다면 공진기 길이 변화에 따라 출력이 민감하게 변할 것으로 예측되나, 공진기 길이가 변하여도 출력의 변동이 거의 없는 실험 결과로부터 실제 열렌즈는 수십 cm 이상의 긴 값일 것으로 추측된다. 그러나 실제 측정을 통한 정확한 분석이 요구된다.

발진하는 레이저의 제2고조파 출력의 공간적 모양을 CCD 카메라로 기록하고 파형을 분석(spiricon LBA 500)한 결과 그림 4(a)에 보듯 거의 TEM<sub>00</sub> 모양을 가짐을 확인할 수 있었다. 이는 종편평의 장점이라 할 수 있다. 그러나 레이저의 종모드 구조를 분석하기 위하여 자유대역폭(FSR)이 20 GHz인 고체 에탈론(R=96%)으로 간섭 무늬를 기록하자 그림 4(b)와 같이 다중모드로 발진함이 관측되었다. 공간모드의 수는 2개 혹은 3개이었으며, 시간이 지남에 따라서 이 수는 변동하면서 간섭편의 중심위치, 각모드의 출력 세기 등도 변함이 관측되었다. 관측된 출력은 그림 5와 같이 약 10분의 시간에 걸쳐 8% 정도의 요동을 보였다. 초기에 출력이 0에서 증가하는 것은 레이저의 스위치를 올리면서 출력이 증가하는 과정을 보이고 있다. 출력 변화를 기록하면서 에탈론의 간섭 무늬 변동을

계속 관측하였다. 또한, 레이저의 시간적 파형을 오실로스코프로 관측하였다. 모드의 수가 변할 때는 모드 사이의 간섭(beat)에 변화가 생겨 수  $\mu$ s 동안 출력이 20~30% 정도 간헐적으로 매우 빠르게 진동하는 모습이 관측되었다. 모드수가 일정하게 유지되어도 수 ms의 주기로 출력이 7~8% 정도 빠르게 지속적으로 요동하는 것이 관측되었다. 이러한 요동의 전체 크기(envelope)는 다시 수초에서 수십초의 주기로 진동하는 듯한 모습을 보인다.

출력 요동의 원인을 파악하기 위하여 LD의 출력 변화 및 온도변화, KTP의 온도 변화 등도 동시에 기록하였으나 이들은 매우 안정되어 있음을 확인할 수 있었다. 공진기 길이가 짧으므로 기관의 온도 변화도 큰 영향을 미치나 기관의 온도는 0.1°C내로 안정되어 있음을 확인하였다. LD에서 나오는 빔의 스펙트럼을 관측하면 시간에 따라서 출력은 일정하여도 스펙트럼의 모양은 계속적으로 변화함을 관측할 수 있었다. 스펙트럼이 변하면 여기효율도 변하므로 이것은 수 ms에 걸친 출력의 변화와 연관할 것으로 생각되며, Kitaoka 등은 단일모드 LD로 여기하여 이러한 요동을 감소시켰다.<sup>[15]</sup> 그러나 이 스펙트럼은 중심위치는 변하지 않고 스펙트럼 모양만 조금씩 바뀌는 것이므로 매우 빠른 시간에 걸쳐 생기는 출력의 변동과 수초에서 수십초에 걸쳐 생기는 요동을 설명하지는 못한다. 에탈론 무늬를 동시에 관측한 결과로부터, 출력의 요동은 종모드의 변동에서 발생하는 부분이 가장 크며, 종모드의 수와 중심 파장을 안정화시켜야 출력도 안정화됨을 확인할 수 있었다.

출력 안정화를 위하여 단일모드 발진 실험을 시도하였으며, 복굴절 필터를 사용하는 방법<sup>[5-10]</sup>과 에탈론을 사용하는 방법<sup>[12]</sup>을 순차적으로 적용해보고 결과를 비교하였다. 에탈론으로는 두께 15  $\mu$ m의 커버글라스(cover glass)와 두께 1 mm의 BK7 유리판을 표면의 코팅이 없이 사용하여 보았다. 표면의 반사율이 4%에 불과하여 피네스가 매우 작고 자유대역폭이 각각 6,600 GHz, 100 GHz로 공진기의 자유대역폭 2.2 GHz에 비하여 아주 큰 값임에도 불구하고, 약간의 조정으로도 그림 4(c)에서의 에탈론 간섭 무늬에서 보듯 단일모드 발진을 쉽게 관측할 수 있었다. 저가의 코팅이 안된 유리판으로도 단일모드 발진이 가능하다는 것을 확인한 것은 경제성 측면에서 매우 유리하다고 할 수 있다. 조정을 거쳐 단일모드로 발진하게 한 다음에 출력의 요동을 측정하였으며, 그림 5에 그 결과가 나와있다. 이 때, 공기의 흐름에 의한 영향을 감소시키기 위하여 실험 테이블을 아크릴 상자로 차단하고 빔의 일부를 갈라서 에탈론으로 보내어 모드의 변화도 동시에 관측하였다. 단일모드를 계속 유지하도록 능동 제어를 하지 않았으므로 중심 파장이 이동하거나 2개의 모드가 동시에 발진하는 등의 변화를 겪으면서 그림 5의 하단 그래프와 같이 출력이 변화하였다. 단일모드가 유지되는 시간은 짧게는 수십초 길게는 20~30분이었다. 그림 5에서, 10분 정도의 시간이 지난 후에 출력이 안정된 시간대가 보임을 알 수 있으며 이 기간이 단일모드가 안정되게 유지되는 시간대이다. 그림에서 단일모드가 10여분간 지속되면서 출력도 매우 안정됨을 보인다. 빠른 시간적 요동도 사라졌다. 이 10여분의 시간동안 그림의 작은 요동이 보이는 부위에서 순간적으로 모드의 요동이 발생하기도 하나 이러

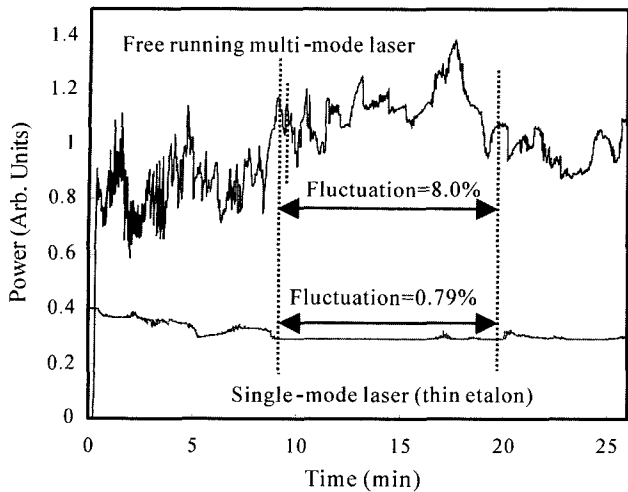


그림 5. 단일모드와 다중모드로 발진하는 레이저 출력의 시간에 따른 변화.

한 순간을 포함하여도 그림에서 보듯 출력 요동은 약 0.8% 이하로 획기적으로 감소하였다.

단일모드가 지속되는 시간과 출력이 안정되는 시간은 매우 불규칙하였다. 다소 긴 시간 단일모드가 유지되는 때가 존재하는 이유는, 에탈론이 단일모드로 발진시켜 모드 사이의 간섭이 없어지게 함으로써 출력안정화 시키는데 기여하는 역할 뿐만 아니라 그 상태가 유지되도록 강제하는 기능도 어느 정도 하는 데 있는 것으로 생각된다. KTP와 Nd:YVO4 결정에서의 약한 에탈론 기능도 다소 복합적으로 기여하리라 생각된다. 능동적인 안정화 장치가 없으므로 단일모드를 장시간 계속 유지시키지는 못하였다. 하지만 단일모드를 안정되게 유지시키면 출력도 매우 안정화시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

공진기의 길이를 65 mm로 두고 LD 온도를 28°C로 안정시킨 다음에 LD 구동 전류에 따른 출력 변화를 측정하였으며, 그림 6에 결과가 나와 있다. 구동 전류가 바뀌면 최소 10분 이상 두어서 어느 정도 안정된 다음에 측정하였다. 얇은 에탈론을 사용한 경우의 최대 출력은 에탈론이 없는 경우에 비하여 75% 정도이었다. 그러나 1 mm 두께의 에탈론을 사용하면 출력은 15% 정도로 감소하였다. 여기 LD의 출력이 작은 결과, 유리판에 의한 공진기의 손실이 출력에 매우 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.

공진기의 Nd:YVO4 결정이 편광기의 역할을 동시에 수행하도록 하는 방법[8-10]으로 단일 종모드 레이저를 발진시키려 KTP의 온도를 변화시켜 보았으나, 온도에 대한 민감도가 매우 크고, 안정된 단일모드가 관측되는 조건을 찾기가 아주 힘들었다. 그러나 동일한 커버글라스를 공진기 내의 KTP와 Nd:YVO4 사이에 브루스터(Brewster) 각으로 두자 쉽게 단일모드로 발진되었다. 이 때 브루스터 판은 기본파의 편광이 지면에 수평함을 고려하여 배치하였다. 단일모드는 수분에서 10분 이상 안정화 장치가 없음에도 유지되었다. 그러나 이 경우 출력은 브루스터 판이 없을 경우에 비하여 40% 정도로 감소하였다. 단일모드가 유지되는 시간 및 출력요동 특성은 에탈론을 사용할 경우와 비슷하였다.

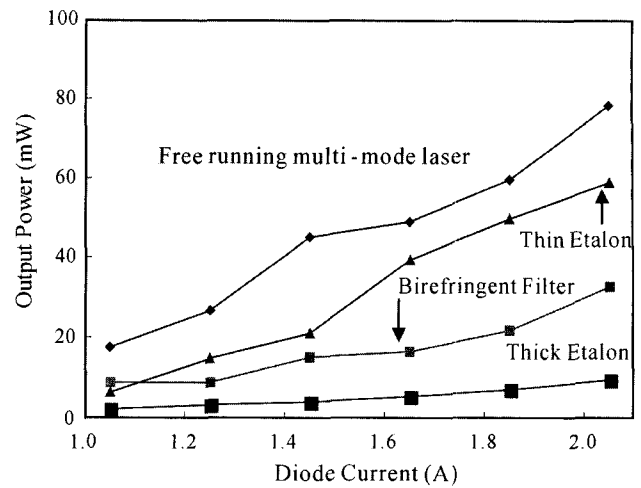


그림 6. 레이저 다이오드의 전류에 따른 단일모드 및 다중모드 레이저 출력의 변화.

레이저 출력경은 기본파가 99% 이상 반사되도록 하였으나, 공진기 내부의 기본파 출력이 강하여 일부는 제2고조파와 섞여 공진기 외부로 새어 나온다. 이 기본파의 편광 상태는 공진 조건에 민감하게 반응한다.<sup>[16]</sup> 이 특성을 이용하면 항상 공진을 유지하도록 하는 되먹임 장치를 구성할 수 있다. 단일모드가 유지된 상태에서 되먹임 장치를 동작시켜 두면, 다른 모드가 발진하려하거나 단일모드의 중심이 이동하려할 때, 공진 조건이 순간적으로 변하므로 기본파의 편광 상태가 변한다. 변한 편광 상태는 파장판과 편광자를 이용하여 검출하며 이를 증폭하여 PZT에 공급하면 공진기의 길이나 에탈론의 기울기를 조절할 수 있어 동일한 상태를 유지할 수 있다. 이 방법을 사용하면 단일모드로 유지시키는 것이 가능하고, 그 결과 출력은 매우 안정될 것으로 생각된다.

### III. 결 론

단일 발광면을 갖는 LD로 Nd:YVO<sub>4</sub> 결정을 여기하고 제2고조파를 발생시키는 공진기를 구성한 다음에 출력 특성을 조사하였다. 제2고조파(532 nm) 레이저의 최대 출력은 출력경의 곡률이 100 mm, 공진기 길이가 45 mm인 때 80 mW이었다. 이 때의 LD의 출력이 1.9 W이었으며 약 4%의 에너지 전환 효율에 해당한다. 레이저빔의 TEM<sub>00</sub> 모드 직경을 계산한 결과, LD 집속빔의 직경이 TEM<sub>00</sub> 모드의 직경이 비슷해질 때 최대 출력이 얻어짐을 알았다. 다중모드로 발진할 때, 레이저의 출력은 종모드 사이의 간섭과 각 모드의 중심 파장의 이동으로 인하여 10분에 걸쳐 약 8%의 요동을 보였다. 이러한 출력 요동을 줄이기 위하여 에탈론과 복굴절 필터를 사용하여 단일모드로 각각 발진하게 하였으며, 그 결과 단일모드로 안정되게 발진하게 하면 출력요동을 최소한 1/10 이하로 줄일 수 있음을 확인하였다. 단순한 커버글라스로 만든 에탈론을 사용하였을 때, 최대 60 mW의 단일모드 출력을 얻었다. 출력과 파장을 안정되게 유지하는 능동제어 장치를 제안하였으며 안정화 실험을 수행할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 2002학년도 영남대학교 학술연구조성비 지원에 의한 것임

참고문헌

[1] W. Koechner, *Solid State Laser Engineering 4th ed.* (Springer - Verlag, Berlin, Germany, 1996) Chapter 6.

[2] D. C. Brown, R. Nelson, and Larry Billings, "Efficient cw end pumped, end-cooled Nd:YVO<sub>4</sub> diode-pumped laser," *Appl. Opt.*, vol. 36, no. 33, pp. 8611-8613, 1997.

[3] 김병태, 박준학, "반도체레이저 단면여기 Nd:S-VAP레이저의 내부공진기 제2고조파 출력 특성," *한국광학회지*, 제 11권 4호, pp. 294-298, 2000.

[4] 정태문, 김광석, 문희중, 이종훈, 김철중, 이종민, "Cr+YAG 포화 흡수체를 이용한 레이저 다이오드 뒷면 여기 Nd:YAG 레이저의 들뜸 효율 및 Q-Switching 특성 연구," *한국광학회지*, 제 9권 3호, pp. 231-235, 1998.

[5] G. J. Friel, A. J. Kemp, T. K. Lake, and B. D. Sinclair, "Compact and efficient Nd:YVO<sub>4</sub> laser that generates a tunable single-frequency green output," *Appl. Opt.* vol. 39, no. 24, pp. 4333-4337, 2000.

[6] A. J. Kemp, Graham J. Friel, T. K. Lake, R. S. Conroy, and B. D. Sinclair, "Polarization effects, birefringent filtering, and single-frequency operation in lasers containing a birefringent gain crystal," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 36, no. 2, pp. 228-235, 2000.

[7] H. Nakai, M. Kume, I. Ohta, H. Shimizu, and M. Kazumura, "Low noise operation of a diode-pumped intracavity doubled Nd:YAG laser using a Brewster plate," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 28 no. 4, pp. 1164-1168, 1992.

[8] Y. Kitaoka, K. Urairi, K. Yamamoto, M. Kato, and T. Sasaki, "High powered green light generation by intracavity frequency doubling using grating feedback optics," *Appl. Opt.* vol. 20 no. 24, pp. 5361-5365, 1995.

[9] Y. Chen, T. Huang, C. Wang, and L. Lee, "Compact and efficient 3.2 W diode-pumped Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP green laser," *Appl. Opt.* vol. 37, no. 24, pp. 5727-5730, 1998.

[10] K. Suzuki, K. Shimomura, A. Eda, and K. Muro, "Low noise diode-pumped intracavity-doubled laser with off-axially cut Nd:YVO<sub>4</sub>," *Opt. Letter*, vol. 19, no. 20, pp. 1624-1626, 1994.

[11] J. J. Zayhowski and A. Mooradian, "Single frequency microchip Nd lasers," *Opt. Lett.*, vol. 14, no. 1, pp. 24-26, 1989.

[12] P. Nachman, J. Munch, and R. Yee, "Diode-pumped, frequency stable, tunable, continuous wave Nd:Glass laser," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 26 no. 2, pp. 317-322, 1990.

[13] T. Baer, "Large-amplitude fluctuation due to longitudinal mode coupling in diode-pumped intracavity-doubled Nd:YAG lasers," *J. Opt. Soc. Amer. B* vol. 3, no. 5, pp. 1175-1180, 1989.

[14] T. Jin, R. F. Bruch, R. Kecke, "Diode pumped single frequency coupled cavity Nd:YVO<sub>4</sub> laser at 532 nm wavelength," R. Scheps Ed., *Solid State Lasers VIII, Proc. SPIE 3613*, pp. 16-22, 1999.

[15] Y. Kitaoka, K. Urairi, K. Yamamoto, M. Kato, and T. Sasaki, "High-powered green light generation by intracavity frequency doubling using grating feedback optics," *Appl. Opt.* vol. 20, no. 24, pp. 5361-5365, 1995.

[16] T. W. Haensch, B. Couillaud, "Laser frequency stabilization by polarization spectroscopy," *Opt. Commun.* vol. 35, no. 2, pp. 441-444, 1980.

A study on the lasing characteristics of diode-pumped, single-mode Nd:YVO<sub>4</sub> green laser

Yongwoo Lee and Jonghoon Yi<sup>†</sup>

Department of Physics, Yeungnam University, Kyongsan 712-749, KOREA

<sup>†</sup>E-mail: jhyi@yu.ac.kr

(Received February 5, 2003, Revised manuscript April 21, 2003)

A diode-pumped single-mode Nd:YVO<sub>4</sub> green laser was developed. Frequency doubling of the laser was achieved by using an intracavity KTP generated green beam (532 nm). By comparing the diode laser spectrum with absorption spectrum of the Nd:YVO<sub>4</sub> crystal, we found optimal operating temperature of the diode laser. From output power measured for various mirror curvatures and cavity lengths, we found the optimal matching of TEM<sub>00</sub> mode with the pump beam gives the best efficiency. When the pump power was 1.9 W, 80 mW of TEM<sub>00</sub> mode green beam was obtained. We tried to get a single longitudinal mode lasing as the fluctuation of the laser power was caused by the shift of longitudinal modes and the beating between the modes. We tested the intracavity etalon method and birefringent filter method for single mode operation. The etalon method resulted in the best single mode output power of 60 mW. The power fluctuation of the single-mode laser was reduced to 1/10 of that of the multi-mode laser.

OCIS codes : 140.3480, 140.3530, 140.3570, 190.4160, 190.2620.