

## 금코팅 유리관 반사체를 이용한 다이오드 여기 고출력 고효율 Nd:YAG 레이저

이종민 · 문희중 · 이종훈 · 한재민 · 이용주

한국원자력연구소 양자광학Lab., 대전 305-600

(1998년 5월 4일 받음, 1998년 5월 28일 수정본 받음)

직경이 10 mm인 유리관의 외벽을 금으로 코팅하여 반사체로 사용하고 최대 출력이 140 W 인 레이저 다이오드바 (laser diode bar) 3개를 여기광원으로 이용한 고효율 Nd:YAG 레이저를 설계 제작하였다. 레이저봉의 지름은 6 mm이며 길이는 130 mm이다. 투과율이 11%인 출력경과 전반사경을 사용하여 선형공진기를 구성하고 연속발전시켰을 때 약 130 W의 Nd:YAG 레이저 연속 출력을 얻었으며 이 때 측정된 기울기 효율은 43%, 광변환 효율은 31%에 도달하였다. 레이저빔의 빔질 인자 (beam quality factor)  $M^2$ 는 최대 다이오드 출력에서 약 85로 관측되었으며 레이저 발전시에 측정된 열렌즈 초점거리의 역수와 여기광의 출력비는 5.3-7.4 D/kW<sub>pump</sub> 이었다.

### I. 서 론

레이저 다이오드 여기 고체 레이저(Diode-Pumped Solid State Laser; DPSSL)는 레이저 다이오드 (LD)의 전기-광학적 효율이 높고 (~40%), 다이오드의 수명이 길며 (>10,000시간), 레이저 매질의 흡수대역에 맞는 파장의 다이오드를 사용하면 광변환 효율을 매우 높힐수 있고, Lamp 여기에 비해 열렌즈 효과가 감소하므로 고효율 발전에 유리한 장점이 있다.<sup>[1,2]</sup> DPSSL의 레이저 매질로는 열적 특성이 우수하고 변환 효율이 높은 Nd:YAG 결정이 주로 사용되며 Nd:YLF, Nd:YVO<sub>4</sub>, Yb:YAG 등에 대해서도 많은 연구가 진행되고 있다.<sup>[3-5]</sup> 다이오드 여기 방식은 광섬유나 다이오드바로부터 출력된 빔을 렌즈계나 빔성형 광학계를 사용하여 좁은 면적에 집속시켜 종횡 평하는 뒷면여기 방식과 다이오드바, 광섬유가 결합된 다이오드, 여러개의 다이오드 배열을 겹친 모양의 stacked 다이오드 배열 등의 여기광을 여러가지 반사체를 이용하여 측면여기시키는 방법이 있다. 뒷면여기 방식에서는 여기광과 레이저광의 공간적 모드를 잘 일치시킬 수 있으므로 30-50%의 높은 광변환 효율이 보고 된바 있다. 또한, 작은 면적에 여기광을 집속시킬 수 있으므로 발산각이 작고 가우시안 공간분포를 가지는 TEM<sub>00</sub> 모드의 레이저 빔을 얻을 수 있다.<sup>[6-10]</sup> 그러나 뒷면여기 시에는 집속에 필요한 광학계가 복잡해져 비용이 증가하고, 열렌즈 효과가 증가하는 등의 단점이 있기 때문에 수십 Watt 이상의 고효율을 갖는 레이저를 개발하기에는 많은 장애가 있다. 한편 측면여기 방식을 사용하면 광변환 효율은 감소하나 다이오드 출력을 레이저 매질에 전달하는 광학계의 구성이 간단하고 큰 부피의 레이저 매질에 여기광이 흡수되므로 대출력의 다이오드 출력을 전달할수 있고 열렌즈 효과도 감소하므로, 고효율 레이저를 구현하는 방식으로 적합하다.<sup>[11-13]</sup>

고출력 레이저에 적합한 측면여기 방식으로는 다이오드 출력을 레이저 매질에 직접 전달하는 방법<sup>[14]</sup>, 난반사체를 이용하는 방법,<sup>[15-17]</sup> 은이나 금이 코팅된 반사체를 이용하는 방법

등의 여러가지가 연구되어 왔다.<sup>[18,19]</sup> 직접여기 방식은 다이오드를 레이저 매질에 근접시키고 다이오드 파장을 레이저 매질 흡수파장에 일치시켜 단일 흡수방식을 취하기 때문에 설계가 용이하나 레이저봉을 측면연마 하여 직접 산란을 줄여야 하고 흡수분포의 불균형을 보완하기 위해 여러 방향에서 여기시키는 방식을 택해야 한다. 최근 다섯곳의 방향에서 700 W의 다이오드 출력을 레이저봉에 직접 측면여기하여 출력 180 W, 기울기 효율 30%를 얻은 결과가 B. J. Le Garrec 등에 의해 보고된 바 있다.<sup>[14]</sup> 난반사체를 이용한 여기방식은 마이크로 렌즈,<sup>[12]</sup> 얇은 유리판,<sup>[17]</sup> 렌즈수송관 등의 전달광학계 (guiding elements)를 사용하거나 다이오드 출력을 직접 난반사체로 제작한 여기용반사기 내에 전달하는 방법을 사용한다.<sup>[16]</sup> 난반사체를 사용하면 여기광이 반사되는 과정에서 방향성을 상실하므로 레이저 매질에 고르게 흡수되어 기울기 효율이 52%까지 도달함이 보고되고 있고,<sup>[17]</sup> 빔의 특성도 우수해진다. 금속 코팅된 반사체를 이용하여 측면에서 여기하는 방식은, 여러 조각의 곡면 반사체를 마이크로 렌즈가 부착된 다이오드바의 반대편에 일정한 각도로 배치하고 다이오드 여기광을 되반사시킴으로써 흡수의 증가와 흡수 분포의 균일성을 꾀하는 방법이다.

본연구에서는 레이저봉의 냉각수관에 직접 금코팅하여 다이오드 여기광의 반사체로 이용하는 방식을 채택하였다. 이 방법은 분리된 반사체를 이용하는 방식보다 제작이 간단하면서도 다이오드바의 취급이 간편하다는 장점이 있으며, 아직까지 구체적인 제작 결과가 보고된 예가 없다. 따라서 본 연구에서는 자체 설계한 금 코팅 유리관 반사체를 이용하고 세 방향에서 다이오드바 출력광을 보내서 고효율의 Nd:YAG 레이저를 발전시키고 그 동작 특성을 조사하였다.

### II. 측면여기 레이저의 설계 및 공진기 구성

자체 설계한 다이오드 측면여기 레이저의 여기장치의 구조

는 그림 1.(a)와 같다. 내경 7.9 mm, 외경 10 mm, 길이 130 mm인 유리관의 외벽에 120° 간격으로 금코팅(반사율 >98%)을 하여 반사면으로 이용하였다. 또한, 반사면 사이에는 2 mm의 폭을 갖는 창을 유리관의 길이 방향으로 제작하여 유리관 내부로 다이오드 여기광이 입사되도록 하였다. 이 부분에는 808 nm 파장의 빛을 무반사시키는 코팅을 하여 다이오드 출력이 유리관 내부로 손실없이 전송되도록 하였다. 구동 전류가 28 A일 때 최대출력이 20 W인 다이오드 어레이 7개가 직선형으로 조립된 다이오드바 (Thomson TH-C 1220-R7, 발산각 40°) 3개를 유리관의 무반사창 부분에 밀착시켜 최대 420 W의 출력이 레이저봉에 전달되도록 하였다. 다이오드 파장은 냉각수의 온도가 20°C 경우, 최대 출력에서 약 806.3 nm이다. 레이저봉은 지름이 6 mm, 길이가 130 mm, Nd<sup>3+</sup>가 0.9% 도핑된 Nd:YAG 결정이며, 봉 가장자리를 따라 발생할 수 있는 기생 발진을 억제하기 위하여 측면연마는 하지 않았다. 냉각수는 레이저봉 및 금코팅된 반사면에서 발생하는 열을 배출시키며 항상 일정한 온도를 유지하도록 하였다.

측면에서 본 레이저 헤드의 형태와 공진기 구성 및 실험장치는 그림 1.(b)에 나타나 있다. 레이저봉은 금속관형 지지대에 실리콘 접착제로 고정시켜 냉각수가 누수되지 않도록 하였다. 제작된 레이저 헤드의 전체길이는 약 150 mm이다. 반사율이 99.8% 이상인 전반사경과 출력경을 사용하여 선형공진기를 구성하고 레이저의 동작특성을 조사하였다. 헬륨-네온 (He-Ne) 레이저 빔을 입사하고 레이저봉에 의해 집속된 초점의 위치를 측정하여 열렌즈효과를 조사하였다. 선형공진기의 길이는 약 25 cm 이었으며 반사율이 다른 여러가지 출력경을 사용하여 반사율에 따른 연속모드 레이저 출력 특성 변

화를 조사하였다.

### III. 열렌즈 및 연속모드 레이저 동작 특성

레이저봉에 의해 집속되는 헬륨-네온 레이저빔의 초점위치 측정으로부터 구한 열렌즈 특성의 결과는 그림 2에 나타나 있다. 여기광의 출력이 405 W 일 경우 출력경을 제거하여 발진이 되지 않도록 하였을 때 열렌즈 초점거리는 26 cm (약 4 디오퍼)로 측정되었으나 11% 투과율의 출력경을 사용하여 발진시키면 약 34 cm (약 3 디오퍼)로 증가했다. 이는 흡수된 에너지의 상당 부분이 출력경을 통해 레이저빔으로 신속히 빠져나가서 열부하가 줄어들기 때문이다. 여기광의 출력이 200 W에서 400 W사이일 때에도, 열렌즈 초점거리 역수의 기울기를 측정하면 출력경을 사용하지 않은 경우는 11.9 D/kW<sub>pump</sub>, 11% 출력경을 사용하면 10.4 D/kW<sub>pump</sub>로 측정되어서 레이저가 발진하면서 열부하가 줄어들었음을 알 수 있다. 한편, 열렌즈 초점거리의 역수와 여기광 출력의 비도 일정하지 않고 여기광 출력에 따라 변하는데 11% 출력경을 사용할 경우 측정값은 5.3-7.4 D/kW<sub>pump</sub>, 출력경을 사용하지 않았을 경우 7.5-9.7 D/kW<sub>pump</sub>로서 각 경우의 초점거리 역수의 기울기값 10.4 D/kW<sub>pump</sub>, 11.9 D/kW<sub>pump</sub>보다도 작다. 레이저봉의 흡수계수가 다이오드 출력에 상관없이 일정하다면 초점거리 역수는 여기광의 출력에 비례할 것이다. 그러나 실제의 경우 여기광의 출력을 증가시키기 위하여 다이오드 전류를 증가시키면, 다이오드 파장이 장파장쪽으로 이동하면서 레이저봉의 흡수계수가 증가하므로 초점거리 역수와 여기광 출력의 관계가 선형관계에서 벗어나게 된다.

열렌즈효과 크기의 레이저봉의 단면적에 반비례한다. 최근, D. Golla 등이 아홉곳의 방향에서 4 mm 지름의 Nd:YAG 봉을 여기시켜 얻은 열렌즈 값인 15.4 D/kW<sub>pump</sub> 보다 본연구에서 6 mm봉을 사용하여 얻은 9.7 D/kW<sub>pump</sub>은 레이저봉의 크기 효과를 고려하면 약간 더 큰 값이다.<sup>[20]</sup> 레이저봉의 열렌즈 효과는 흡수광의 분포가 균일할 수록 작아지므로 본연구에서와 같이 세방향에서만 여기시킨 방식으로 인하여 열렌즈효과가 더 심해졌다고 판단된다. 실제 열렌즈 효과를 측정하기 위하여 사용하는 헬륨네온 레이저는 원형의 공간적 세기분포를

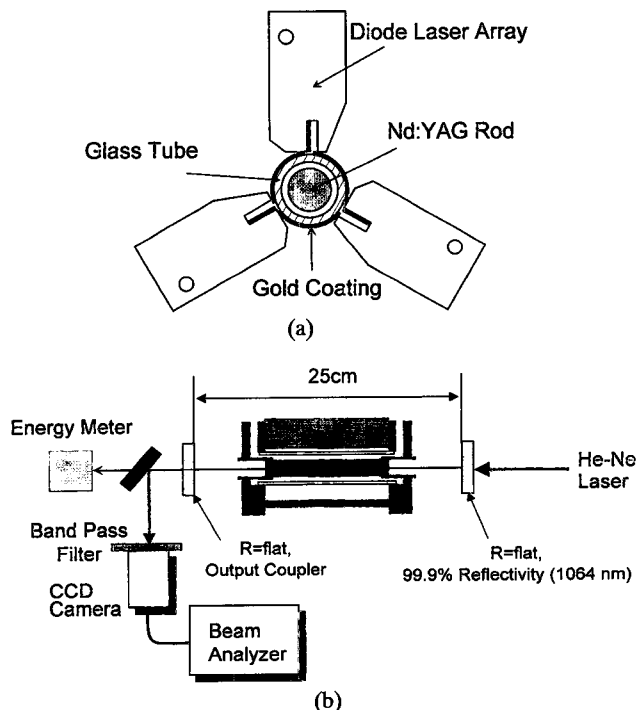


그림 1. (a) 다이오드 측면여기 레이저 헤드의 구조 (b) 레이저 공진기의 구성 및 실험장치

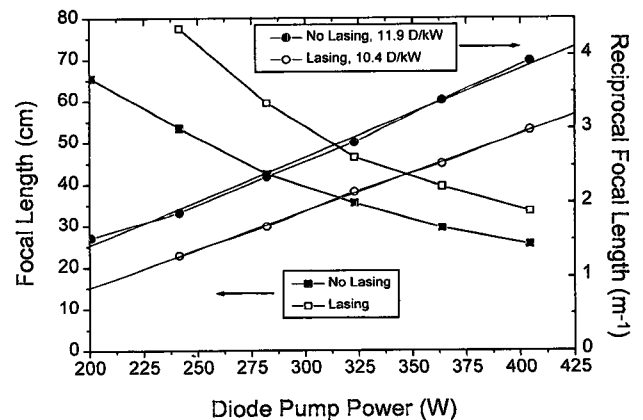


그림 2. 레이저봉의 열렌즈 초점거리 및 초점거리의 역수

가졌다가 레이저빔이 봉을 지나면서 삼각형의 형태로 바뀌어 짐이 관측되었으며 이로부터 여기광의 흡수분포가 삼각형 모양 비슷해짐을 알 수 있었다.

냉각수의 온도와 출력경의 반사율을 여러가지로 변화시키면서 다이오드 여기광의 출력에 따른 레이저 출력을 구한 결과는 그림 3에 나타나 있다. 다이오드 냉각수가 17°C (다이오드 파장:~805.5 nm)이고 최대 여기광의 출력이 425 W 일 때 투과율이 6%인 출력경을 사용하여 130 W의 출력을 얻을 수 있었다. 투과율을 11%로 바꾸었을 때 레이저 출력은 131.5 W로 약간 증가하며 기울기 효율은 43%, 광변환 효율은 약 31%로 매우 높은 값을 보였다. 15% 출력경을 사용하면 출력이 116 W로 줄어들면서 기울기 효율도 42.3%로 감소함을 보아 최적의 출력경 투과율은 약 7-10% 사이로 추정된다. 한편 다이오드 냉각수의 온도를 21°C로 증가시키고 (다이오드 파장:~806.6 nm) 11% 출력경을 사용하면 126 W로 레이저 출력이 감소하고 기울기 효율도 40%로 작아졌다. 이는 다이오드 파장이 증가하고 이에 따라 레이저봉의 흡수계수가 증가함에 따라 흡수분포가 조금 더 불균일해졌기 때문으로 해석된다. 다이오드 냉각수 온도를 더 낮추면 흡수계수가 작아져 다이오드 출력이 레이저봉 내부까지 고르게 여기시켜 효율이 증가되리라 예상되나 다이오드 표면의 결로현상에 따른 다이오드의 손상을 방지하기 위하여 최저온도를 17°C로 제한하였다.

이상에서 살펴본 바와 같이 자체 제작한 레이저는 세방향에서 여기시켰음에도 상당한 광변환 효율을 보인다. D. Golla 등의 결과인 32% 기울기 효율, 29% 광변환 효율보다도 우수한 결과를 얻었으며, B. J. Le Garrec 등이 다섯 방향에서 808 nm 파장의 다이오드 출력을 직접 레이저봉에 전달하여 여기시키는 방식을 사용하여 얻은 결과인 기울기 효율 30%, 광변환 효율 26% 보다도 증가하였다.<sup>[20,14]</sup> 기존의 결과보다도 큰 효율을 얻게된 이유는 다이오드 파장을 레이저봉 흡수피크 (808.5 nm)에서 3 nm 정도 벗어나게 하여 흡수 분포가 더 균일하도록 하였고, 금코팅 반사면에서 한번 더 반사된 여기광이 재흡수되도록 함으로서 흡수율을 증가시켰기 때문으로 판단된다.

이 같은 추론을 확인하기 위하여 여기광의 흡수분포를 측정하였다. 흡수분포는 다이오드에 의하여 여기된 레이저봉에

서 발생하는 형광의 분포로부터 측정하며, 형광분포는 1.06 μm 파장의 빛만 투과하는 필터를 렌즈와 CCD 카메라 앞에 두고 레이저봉의 중심부위를 결상시켜 측정하였다. 그림 4.(a)는 다이오드 전류가 8 A 일 때 레이저봉 가운데에서의 형광 세기가 크고 양쪽이 거의 대칭인 분포를 나타낸다. 그림 4.(b)는 여기광의 출력이 425 W일 때 형광 분포이다. 다이오드 전류가 증가함에 따라 다이오드 입사 경계면에서의 흡수가 증가하여 분포가 불균일해지나 세방향 여기광의 상당부분이 레이저봉의 중심부까지 여기시키고 중심부에서는 각방향에서의 여기가 중첩되는 결과, 여기광이 입사되는 부위에서부터 레이저봉의 중심부위까지는 흡수분포가 상당히 균일해지므로 그림 3에 보인 바와 같이 큰 변환 효율을 얻을 수 있었다. 여기광이 입사되는 부위의 반대편에서는 형광의 세기가 중심부에 비하여 상대적으로 약함을 보아서 여기광의 상당 부분은 레이저봉을 투과하는 과정에서 흡수되고 일부의 빔만 금코팅에 의하여 되반사 되며 되반사된 여기광의 대부분이 흡수되는 것으로 판단된다. 레이저봉의 주변부에서는 다이오드 여기광이 입사되는 부위에서 주로 여기되어 삼각형의 분포를 보이고 있으나 세방향 이상의 측면 여기방식을 취하고 다이오드 파장을 단파장으로 조절하면 원형의 분포에 가까워져 효율이 더욱 증가할 것으로 예측된다.

레이저빔의 질은 빔 질인자  $M^2$ 를 측정하여 판단할 수 있다. 레이저빔의 반경  $\omega(z)$ 는 공진기로부터 다음과 같은 진행방정식을 만족한다고 가정할 수 있다.<sup>[21]</sup>

$$\omega^2(z) = \omega_0^2 [1 + z^2 \frac{(\lambda M^2)^2}{(\pi \omega_0)^2}] \tag{1}$$

여기서  $\omega_0$ 는 출력경에서의 빔반경 (spot size),  $z$ 는 출력경으로부터 빔 진행거리를 나타낸다. 본 실험에서는  $z$ 가 정해진 두 지점의 빔반경을 측정하여 식 (1)로부터  $M^2$ 를 계산하였고 그 결과가 그림 5에 나타나 있다. 이로부터 x방향(그림 4의 가로 방향)의  $M_x^2$ 가  $M_y^2$ 보다 상당히 작음을 알 수 있으며 이는 y방향을 따라 여기광의 분포가 상대적으로 커 열렌즈효과가 심해졌기 때문으로 이해된다. 여기광의 출력이 증가하면  $M^2$  값도 증가하며 최대 여기광 출력에서  $M_x^2$ 값은 약 85에 이르고 이 때 측정된  $\omega_0$ 는 약 2.6 mm, 빔발산각은 약 11 mrad 이었

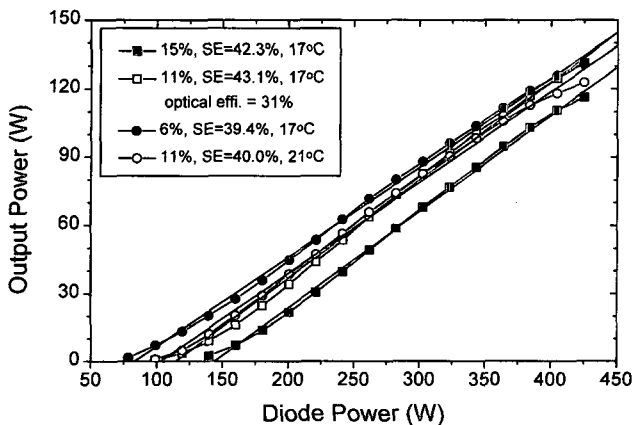


그림 3. 다이오드 출력에 따른 레이저 출력 변화 (SE=기울기 효율)

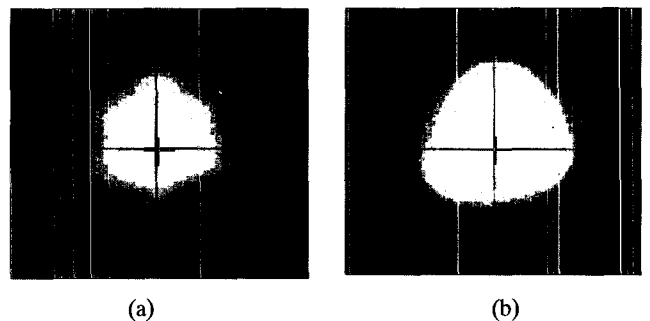


그림 4. CCD 카메라로 측정한 레이저봉에서의 형광분포의 변화. (a) 세개의 다이오드를 사용하여 여기한 경우; I=8A (여기광의 출력=16 W), (b) I=28 A (여기광의 출력=425 W)

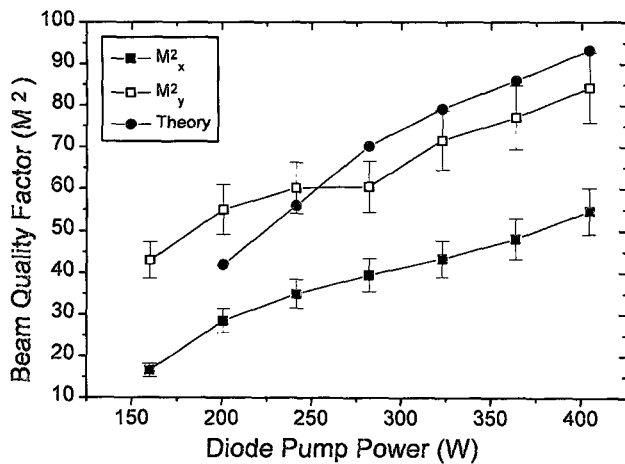


그림 5. 여기광의 출력에 따른 레이저빔의  $M^2$  측정과 계산된  $M^2$ 의 변화

다. 레이저봉의 지름이 6 mm로 크므로  $M^2$ 가 큰 것은 불가피하다. 더 작은 지름의 레이저봉을 사용하거나 공진기 길이를 증가시키면  $M^2$ 를 향상시킬 수 있을 것이다. 그림 2로부터 구한 레이저봉의 열렌즈효과를 고려하고 레이저봉에 다이오드 출력이 균일하게 흡수된다고 가정하여 계산한  $M^2$  값 결과와 비교해 보면, 측정치는 계산된 값보다 작다. 이는 실제 흡수분포가 그림 4에서와 같이 가운데 부분에서 크고 가장자리에서는 원주방향으로 불균일하기 때문에 빔반경이 작은 모드들이 우세하게 발진된 것으로 이해된다.

#### IV. 결 론

금코팅 유리관 반사체를 사용하여 자체 제작한 다이오드 측면여기 Nd:YAG 레이저의 출력과 열렌즈 상수,  $M^2$  등을 조사하였다. 지름이 10 mm인 작은 유리관을 냉각수관과 다이오드 여기광의 반사체로 동시에 사용하고 세방향에서 여기시키는 구조를 갖는 고출력 레이저를 실현할 수 있었다. 지름이 6 mm인 레이저봉의 열렌즈효과는 10.4 D/kW<sub>pump</sub> 였다. 11% 출력경을 사용하고 여기광의 출력이 425 W 일 때, 연속발진 레이저의 출력은 131.5 W였고 이 결과는 기울기 효율 43%, 광변환 효율 31%의 비교적 높은 효율에 해당한다. 다이오드 냉각수의 온도가 낮을 수록 출력은 증가하였으며 이는 흡수계수의 감소로 인하여 흡수광이 균일하게 분포되고 그 결과 열렌즈효과가 감소하였기 때문으로 해석할 수 있었다. 발생된 레이저빔의  $M^2$ 는 최대 출력에서 약 85의 큰 값을 가졌고 지름이 작은 레이저봉을 사용하면 줄일 수 있을 것이다.

본 연구에서 세방향 다이오드 여기 구조로도 매우 높은 효율을 갖는 고출력 레이저를 실현할 수 있었으므로 금코팅 반사체를 이용한 측면여기 구조가 고출력 레이저에 매우 적합

하다고 결론지을 수 있다. 출력경의 반사율을 10-7% 사이로 조절하고 다섯방향 이상에서 여기시키면 효율은 더욱 증가하고 흡수분포의 균일도가 향상될 것이다.  $M^2$ 의 향상을 도모하기 위해 더 작은 레이저봉을 사용하면 흡수율은 감소할 것이나 그 분포가 균일할 것이므로 기울기 효율이나 광변환 효율이 크게 감소하지는 않을 것으로 예측된다. 또한, 본 실험에서는 무반사 코팅된 부분의 폭이 2 mm로 큰 편이었는데, 앞으로 이 폭을 1 mm 이내로 줄이면 누설광에 의한 손실이 감소하여 흡수율이 증가하고 효율이 향상 될 것이다.

#### 참고문헌

- [1] Y. Kitaoka, K. Yamamoto and M. Kato, *Opt. Lett.* **19**, 810(1994).
- [2] Jongmin Lee, H. J. Moon and Jonghoon Yi, *J. Opt. Soc. Kor.* **2**, 5(1998).
- [3] M. D. Selker, R. S. Afzal and P. Reichert, *IEEE J-QE.* **30**, 1616(1994).
- [4] J. E. Bernard and A. J. Alcock, *Opt. Lett.* **18**, 968(1993).
- [5] H. Bruesselbach and D. S. Sumida, *Opt. Lett.* **21**, 480(1996).
- [6] I. Freitag, A. Tünnermann and H. Welling, *Opt. Commun.* **115**, 511(1995).
- [7] V. Kushawaha and Y. Chen, *Appl. Phys. B* **59**, 659(1994).
- [8] S. C. Tidwell, J. F. Seamans and M. S. Bowers, *Opt. Lett.* **18**, 116(1993).
- [9] Y. Kaneda, M. Oka, H. Masuda and S. Kubota, *Opt. Lett.* **17**, 1003(1992).
- [10] W. A. Clarkson and D. C. Hanna, *Opt. Lett.* **21**, 869(1996).
- [11] D. Golla, M. Bode, S. Knoke, W. Schöne and A. Tünnermann, *Opt. Lett.* **21**, 210(1996).
- [12] D. Golla, S. Knoke, W. Schöne, G. Erst, M. Bode, A. Tünnermann and H. Welling, *Opt. Lett.* **20**, 1148(1995).
- [13] S. Konno, S. Fujikawa and K. Yasui, *Appl. Phys. Lett.* **70**(20), 2650(1997).
- [14] B. J. Le Garrec, G. J. Razé, P. Y. Thro and M. Gilbert, *Opt. Lett.* **21**, 1990(1996).
- [15] 김광석, 김연수, 김정묵, 김철중, *응용물리* **10**, 423(1997).
- [16] T. Brand, *Opt. Lett.* **20**, 1776(1995).
- [17] T. Kojima and K. Yasui, *Appl. Opt.* **36**, 4981(1997).
- [18] F. Hanson and D. Haddock, *Appl. Opt.* **27**, 80(1988).
- [19] R. J. Shine, J. A. J. Alfrey and R. L. Byer, *Opt. Lett.* **20**, 459(1995).
- [20] D. Golla, S. Knoke, W. Schöne, A. Tünnermann and H. Schmidt, *Appl. Phys. B* **58**, 389(1994).
- [21] D. R. Whitehouse, *SPIE* **1834**, 86(1992).

## **Efficient Diode Pumped High Power Nd:YAG Laser with a Gold Coated Flow Tube**

Jongmin Lee, Hee-Jong Moon, Jonghoon Yi, Jaemin Han, and Yongjoo Rhee  
*Laboratory for Quantum Optics, Korea Atomic Energy Research Institute, Taejon 305-600*

(Received May 4, 1998 Revised manuscript received May 28, 1998)

We fabricated a diode-side pumped high power Nd:YAG laser with a gold coated flow tube (diameter of 10 mm) and three sets of 140 W diode bar. The diameter of Nd:YAG rod was 6 mm and its length was 130 mm. We obtained 130 W cw power from a linear resonator with an 11% output coupler, which corresponds to the slope efficiency of 43% and the optical efficiency of 31%. The measured beam quality factor ( $M^2$ ) reached about 85 which is fairly large due to the large size of the rod. Thermal lensing of the rod was measured to be 5.3-7.4 D/kW<sub>pump</sub> when the laser was operating.