

다이오드 측면여기 고출력 Nd:YAG 레이저의 발전 특성

문희종[†] · 이성만 · 김현수 · 고도경 · 차병헌 · 이종민

한국원자력연구소 양자광학기술개발팀

Ⓣ 305-600 대전광역시 유성우체국 사서함 15호

이종훈

영남대학교 물리학과

Ⓣ 712-749 경북 경산시 대동 214-1번지

(2000년 9월 15일 받음, 2000년 10월 17일 수정본 받음)

Lambertian 산란 특성을 갖는 난반사체를 적용하고 1kW의 출력을 갖는 고출력 레이저 다이오드를 여기광원으로 이용하여 고출력 Nd:YAG 레이저를 제작하였다. 지름이 5 mm인 레이저봉을 사용하고 짧은 공진기를 구성하여 연속발전시켰을 때 약 500 W의 고출력을 얻을 수 있었고 이 때 기율기 효율은 49%, 광변환효율 46.7%로 매우 높은 효율을 얻었다. 지름이 6 mm인 레이저봉을 사용하였을 때에는 LD 여기광의 흡수 분포가 불균일해져서 광변환효율은 감소하였다. 발생한 레이저빔의 빔 질 인자(Beam Quality Factor) M^2 는 약 70 정도로 관측되었으며 이는 측정된 열렌즈 초점거리로부터 계산된 빔질인자보다 약간 작은 값으로 여기광의 흡수 분포가 매우 균일함을 보여준다.

OCIS codes : 140.2020, 140.3460, 140.3530, 140.3580.

I. 서 론

고체 레이저의 여기원으로서의 레이저 다이오드(LD)는 40% 이상의 높은 전기-광 변환효율과 10,000시간 이상의 긴 수명, 레이저 매질의 흡수대역에 맞는 좁은 선폭(2 nm 이하)의 파장으로 인해 고효율 고체레이저의 여기원으로서 각광을 받고 있다. 아울러 LD 여기 방식은 선폭이 매우 넓은 Lamp 여기 방식과 비교하여 불필요한 열의 발생을 억제하므로 레이저봉의 열렌즈 효과의 감소와 냉각장치의 소형화를 구현할 수 있어 전체 고체레이저의 규모를 소형화할 수 있는 장점을 지니고 있다. 최근 LD 제조기술의 향상과 다이오드 어레이 냉각 기술의 진보로 인해 LD 가격의 하락 추세를 이어가고 있어 조만간 기존의 플래쉬 여기 방식을 완전히 대체할 것으로 기대되고 있다. 이와 같은 다이오드 여기 고체레이저(diode-pumped solid state laser; DPSSL)는 중저 출력 레벨에서 마킹용, 의료용 레이저로 상품화되고 있으며 자동차, 조선, 기계, 철강산업등 거의 모든 레이저 가공장치에 적용될 것으로 예측되고 있다.

다이오드 여기 방식은 광섬유나 다이오드바로부터 출력된 빔을 렌즈계나 빔변형 광학계(beam shaping optics)를 사용하여 중땀핑하는 뒷면여기(end pumping) 방식과 다이오드바, stacked LD array 등의 여기광을 여러가지 반사체를 이용하여 횡땀핑하는 측면여기(side pumping) 방식이 있다. 뒷면여기 방식은 좁은 면적에 LD 여기광을 집중시킬 수 있기 때문에 발전되는 레이저광의 공간적 모드결합을 높일 수 있어 30~

50%의 높은 광변환효율을 달성할 수 있다.^[1-4] 이는 빔 발산각이 매우 작은 TEM₀₀ 발진에 유리하며 저출력 DPSSL에 유리하다. 뒷면여기 방식은 모드 정합을 위해 필요한 광학계의 복잡성과 고비용, 좁은 면적에서 발생하는 열에 의한 열렌즈 효과의 증가등과 같은 단점을 지니고 있기 때문에 고출력 레이저에 적용하기에는 한계가 있다. 이에 비해 측면여기 방식은 다이오드 출력을 레이저 매질에 측면으로 여기시키므로 전달 광학계가 간단하고, 큰 부피의 레이저 매질에 여기광을 흡수시킬 수 있으므로 뒷면여기 방식보다 광변환효율은 감소하지만 열렌즈 효과를 감소시킬 수 있기 때문에 고출력 레이저를 구현하는 방식으로 적합하다.^[5-9]

고출력 레이저에 적합한 측면여기 방식에서는 다양한 형태의 빔 전달 장치가 활용되고 있다. 측면여기 방식에는 직접 LD출력을 레이저매질에 전달하는 방법,^[10] CPC(Compound Parabolic Concentrator) 구조의 전달광학계를 이용하는 방법,^[11,12] 난반사체(diffusive reflector)의 다중반사를 이용하는 방법,^[13-15] 은(silver)이나 금(gold)이 코팅된 반사체의 이중 반사를 이용하는 방법등이 연구되어 왔다.^[16,17] 그 중 난반사체를 이용한 여기방식은 마이크로 렌즈(microlens), 얇은 유리판(thin glass plate),^[15] lens duck등의 전달광학계(guiding elements)를 사용하거나 LD출력을 좁은 슬릿을 통해 직접 난반사체 내에 전달하는 방법^[18-20] 등이 보고되어 왔다. 난반사체 방식은 흡수분포의 균일성을 꾀할 수 있어 높은 기율기 효율과, 빔발산각이 작은 좋은 빔질을 달성할 수 있는 장점이 있다. 최근 spectralon 난반사체의 좁은 슬릿을 통한 직접 여기방식으로 기율기 효율 55%의 고효율이 보고되고 있고,^[19] 이와 같은 방식으로 다중 모드 연속출력 200 W급의 레이저 출력을 얻은 결과가 보고되

[†]E-mail: hjmoon@kaeri.re.kr

고 있는 점은^[21] spectralon 난반사체 여기 방식이 고효율, 고효율 레이저에 매우 적합한 방식임을 보여준다.

Spectralon 난반사체는 테프론 입자를 압축하여 만든 재질로서, 808 nm 파장에서 반사율은 96% 이상이어서 흡수에 의한 열의 발생이 매우 작은 편이다. 하지만 다이오드 출력이 매우 높아지면 약간의 흡수에 의해서도 난반사체의 온도가 높아지므로 난반사체를 냉각시키지 않으면 bonding 분자의 결합이 깨져 난반사체의 기능을 상실할 우려가 있다. 난반사체에 나있는 좁은 슬릿을 통한 직접여기 방식에서는 난반사체를 냉각수를 이용하여 냉각시키기가 어려우므로 어느 정도의 고효율 레벨까지 출력 증대가 가능한지가 고효율 레이저의 개발에 있어 매우 중요해진다. 본 연구에서는 자체 설계한 난반사체 여기방식으로 1kW급의 LD 여기 출력에서도 고효율 Nd:YAG 레이저가 안정적으로 발진할 수 있음을 확인하고 그 동작 특성을 조사하였다.

II. 측면여기 Nd:YAG 레이저의 설계

설계 제작한 다이오드 측면여기 Nd:YAG 레이저 헤드의 개략적인 구조가 그림 1에 나타나 있다. 120° 간격으로 나 있는 좁은 슬릿을 통해 LD 여기광이 입사하도록 하였고 난반사면인 안쪽 면의 지름은 16 mm였다. 슬릿의 폭은 1.3 mm로 좁게 하였고 LD 발광면이 모두 슬릿에 위치되도록 설계하였다. 최대출력이 40 W인 다이오드 어레이 9개가 직선형으로 조립된 다이오드바(IMC; Industrial Microphotonics Company사)를 여기원으로 사용하였다. 이 LD바는 40 W 출력을 갖는 Silver Bullets이 heat exchange에 9개가 직렬로 연결된 형태로서 808 nm 파장에서 총 360 W의 출력을 낸다. 360 W LD바 3개를 직렬연결하여 Nd:YAG 붓에 여기되는 LD 총 출력은 1080 W였다. 다이오드 파장은 냉각수의 온도가 20°C일 경우 최대 출력에서 807.3 nm를 중심으로 약 2.6 nm의 분포를 보였다. 레이저붕은 지름이 6 mm 또는 5 mm, 길이가 120 mm, Nd³⁺가 0.6% 도핑된 Nd:YAG로서 양면에 808 nm 무반사코팅되어 있고 측면에는 연마가 되어 있지 않아 붓 주위를 따라

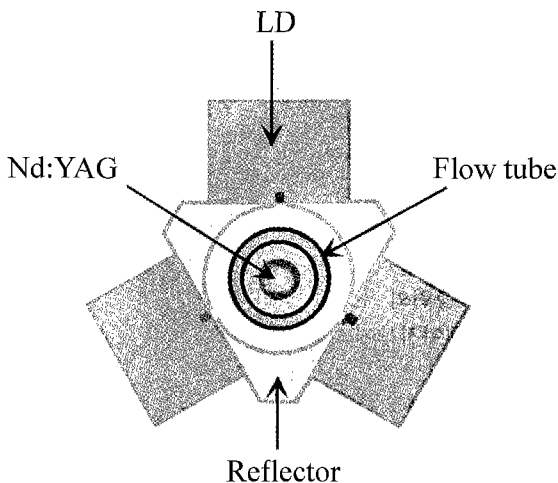
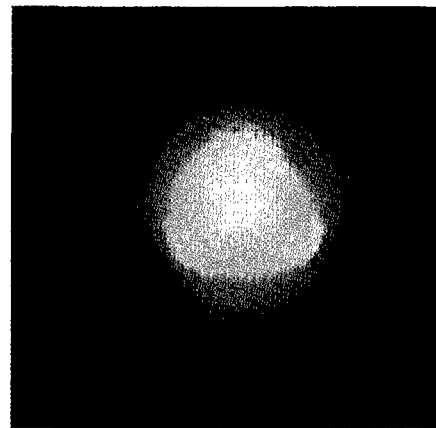


그림 1. 난반사체를 이용한 다이오드 측면여기 레이저 헤드의 구조.

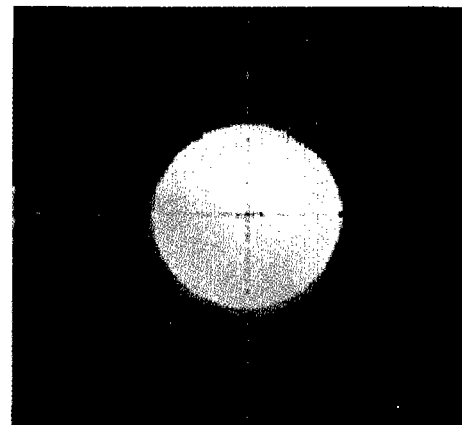
발생할 수 있는 레이징 발진을 억제하도록 하였다. 레이저붕에서 발생한 열은 flow tube를 흐르는 냉각수로 냉각되도록 하였다. 레이저붕은 금속 슬리브(metal sleeve)에 실리콘 접착제로 고정되어 냉각수가 누수되지 않도록 하였고 레이저 헤드의 전체길이는 약 170 mm였다.

III. 레이저붕에 따른 형광분포

자체 제작한 레이저의 출력 특성은 레이저붕에서의 흡수분포의 균일성에 의해 크게 좌우된다. 그림 2에 CCD 카메라로 측정된 레이저붕의 크기에 따른 형광분포의 변화가 나타나 있다. 그림의 (a)는 레이저붕의 직경이 6 mm인 경우로서 펌프광의 세기가 약 900 W일 때 형광 분포이다. 형광분포는 망원렌즈로 레이저붕 중심 위치에서의 형광 상을 결상시킨 것을 CCD로 검출한 것이다. 6 mm 레이저붕의 경우 형광 분포는 세 곳의 형광이 표면 근처까지 나와서 삼각형과 원형이 합성된 모양을 갖고 있다. 레이저붕의 중심부에서는 각 방향에서의 여기가 증첩되는 결과, 흡수분포가 상당히 균일해짐을 보인다. 하지만 레이저붕 주변부에서는 다이오드 여기광이 입사되는 부위에서 주로 여기가 일어나므로 삼각형의 분포를 보이고 있다. 이로부터 6 mm 레이저붕의 경우 설계된 펌프 헤드



(a)



(b)

그림 2. 레이저붕의 형광 분포. (a) 레이저붕의 직경이 6 mm 인 경우, (b) 레이저붕의 직경이 5 mm 인 경우.

의 최적 조건에서 약간 벗어났음을 확인할 수 있다. 즉 40° 정도의 발산각을 갖고 퍼지는 LD 여기광이 flow tube에서 굴절되어 레이저봉에 직접 전달될 때 레이저봉의 안쪽으로 진행되기 때문에 난반사체에 의해 흡수 분포가 균일해졌음에도 그 효과가 남아있다고 볼 수 있다.

그림의 (b)는 레이저봉의 직경이 5 mm이고 여기광의 세기가 약 900 W일 때 형광 분포를 보여준다. 이 경우에는 형광 분포가 가운데 부분이 약간 세지만 전체적으로 훨씬 균일한 분포를 나타낸다. (a)의 경우처럼 레이저봉 단면에서의 불균일도도 거의 없으며 각 방향으로도 매우 대칭적인 분포를 지니고 있다. 따라서 직경 5 mm는 설계된 펌프 헤드의 최적 조건에 근접한 크기임을 알 수 있다. 이는 발산하는 LD 여기광 profile 내에 레이저봉 경계면이 존재하고 난반사체의 난반사 특성이 충실히 반영되어 균일한 분포를 유도했음을 의미한다. 따라서 형광분포의 균일도에 크게 좌우되는 출력의 세기, 레이저 빔 균일도, 빔질 인자등은 5 mm 레이저봉을 사용하였을 경우 6 mm 레이저봉 보다 훨씬 우수한 특성을 보일 것으로 예측되었다.

IV. 다중모드 연속출력 특성

설계 제작된 펌프 헤드를 이용하여 반사율이 99.5% 이상인 전반사경과 출력경으로 선형공진기(linear resonator)를 구성하고 레이저 동작특성을 조사하였다. 선형공진기의 길이는 약 20~35 cm로 조절하였고 반사율이 다른 여러가지 출력경으로 연속 출력 특성을 조사하였다. 공진기 길이를 27 cm로 고정하고 5 mm 레이저봉을 사용하였을 경우, 반사율을 달리하면서 측정된 다이오드 여기광의 세기에 따른 레이저 출력이 그림 3에 나타나 있다. 85% 반사율의 출력경을 사용하였을 때 최대 여기광의 세기에서 약 450 W의 출력을 얻을 수 있었다. 출력경의 반사율을 80%로 낮추어도 비슷한 세기의 출력을 얻을 수 있었으나 90% 반사율의 출력경을 사용하였을 때에는 390 W로 그 출력이 감소하였다. 따라서 최대의 출력을 얻는 최적의 반사율은 85% 근처임을 확인할 수 있었다.

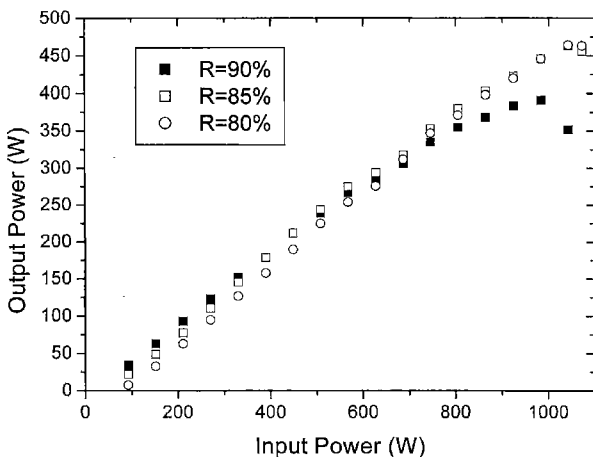


그림 3. 출력경의 반사율에 따른 레이저 출력의 변화(5 mm 레이저 봉인 경우, R: 출력경의 반사율).

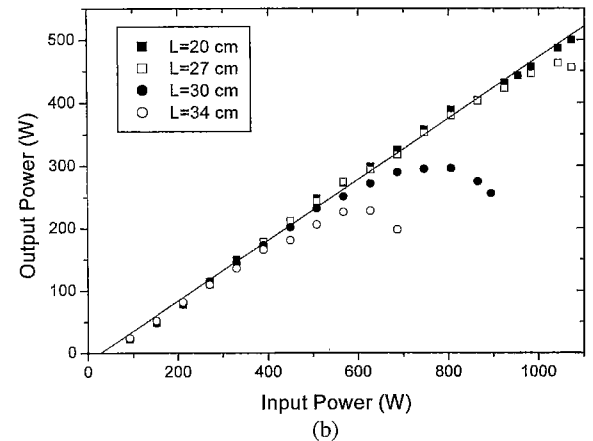
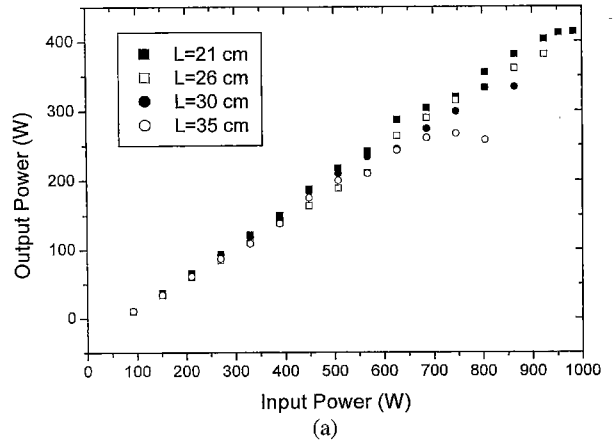


그림 4. 선형 공진기 길이에 따른 출력 변화(L: 공진기 길이). (a) 레이저봉의 직경이 6 mm인 경우, (b) 레이저봉의 직경이 5 mm인 경우.

출력경의 반사율을 최적 반사율에 가까운 85%로 고정하고 공진기 길이를 약 5 cm씩 변화시키면서 측정된 연속 레이저 출력이 그림 4에 나타나 있다. 그림의 (a)는 레이저봉의 직경이 6 mm, 그림의 (b)는 레이저봉의 직경이 5 mm일 때의 다이오드 여기광의 세기에 따른 출력 곡선이다. 공진기 길이가 21 cm로 짧고 6 mm 레이저봉을 사용하였을 경우(그림 4(a))에는, 최대 연속 출력은 410 W까지 도달하였다. 이 때의 기율기 효율은 46%이었으며, 최대 다이오드 레이저 출력에서 Nd:YAG 레이저로의 광변환효율(optical-to-optical efficiency)은 41%의 비교적 높은 효율을 얻었다. 공진기 길이가 26 cm로 증가하여도 출력 변화는 거의 없었다. 그러나 공진기 길이가 30 cm가 되면 340 W 이상으로 증가하지 못한다. 더욱 공진기 길이를 늘려서 35 cm가 되도록 하면 최대 270 W에서 최고가 된 다음 다이오드 출력을 증가시켜도 레이저의 출력은 오히려 감소한다. 이러한 출력의 포화가 나타나는 이유는 열렌즈 효과 때문이다. 즉, 레이저봉에 흡수된 다이오드 레이저의 에너지가 다른 파장을 가진 광자로 변환되는 과정에서 일부는 열로 변환되고, 이 열로 인하여 레이저봉 중심부와 표면의 굴절율이 다르게 된다. 냉각수는 레이저 봉의 표면만 주로 냉각시키므로 중심부의 온도는 외부에 비하여 어느 정도 높은 상태이다. 따라서 레이저봉 전체가 두꺼운 렌즈 역할을 하게 되고 이

로 인하여 레이저의 발진 안정 조건이 깨어진다. 또한 이러한 렌즈 작용에 의하여 여기된 레이저봉 전체가 레이저 발진에 사용되지 못하고 일부만 이용되어 효율이 감소하게 된다. 이러한 열렌즈 효과는 다이오드 레이저의 출력이 높을수록 심해 지므로 출력의 포화 현상이 발생하는 것이다.

5 mm 레이저봉의 경우 공진기 길이를 20 cm로 짧게 하였을 때 그림 4(b)에 나타나 있는 바와 같이 1070 W 여기광의 세기에서 500 W의 연속출력을 얻을 수 있었다. 이 때 기울기 효율은 약 49%, 광변환 효율은 46.7%로 매우 높은 값을 얻을 수 있었다. 공진기 길이를 27 cm로 증가시키면 최대 여기광의 세기 근처에서 출력 감소가 약간 생기지만 전체적인 출력 곡선에는 큰 변화가 없었다. 그러나 공진기 길이를 30 cm 이상으로 늘리면 출력 포화가 여기광의 세기 800 W 이하에서 생김을 볼 수 있다. 6 mm 레이저봉의 경우와 비교하여 더 작은 여기광의 세기에서 출력 포화가 일어남을 알 수 있는데, 이는 열렌즈 초점거리가 같은 여기광의 세기에서 5 mm 레이저봉의 경우가 더 짧기 때문으로 이해할 수 있다. 5 mm 레이저봉의 경우는 6 mm 레이저봉보다 여기광의 흡수 효율이 적음에도 불구하고 기울기 효율과 광변환 효율이 크게 나타난 점은 5 mm 레이저봉이 훨씬 더 균일한 흡수 분포를 갖고 있기 때문이다. 최대 여기광의 세기에서 측정된 난반사체의 표면 온도는 약 50°C 정도였다. 350°C 정도까지 결합 분자의 bonding이 깨지지 않는 열적 안정성을 갖는 spectralon 난반사체의 특성을 고려하면 흡수에 의한 난반사체의 온도 상승이 큰 문제가 되지 않고 있다. 따라서 이와 같은 여기 구조에서 더 높은 출력으로의 출력 증대가 가능하고 고효율 특성을 유지할 수 있을 것으로 기대된다.

최근에 이와 같은 구조에서 기울기 효율 55%의 고효율을 보고한 바 있다.^[19] 본 연구에서 측정한 기울기 효율 49%는 이전의 결과와 비교하여 낮은 값을 보이는데 이는 LD 파장의 상이함에서 찾을 수 있을 것이다. 이전의 펄프헤드에서 사용한 LD 파장은 최대 여기광의 세기에서 805 nm였지만 본 연구에서의 LD 파장은 807.3 nm였다. Nd:YAG는 805 nm 근처에 작은 흡수 피크가 존재하고 808 nm 근처에 더 큰 흡수 피크가 존재한다. 이전의 펄프헤드에서는 다이오드 전류가 증가함에 따라 흡수 효율이 증가하는 영향이 큰 기울기 효율로 나타난 것이고 본 연구에서는 다이오드 전류가 증가함에 따라 흡수 효율이 증가하다가 다시 감소하고 그 이후 다시 증가하는 경향을 나타내기 때문에 기울기 효율이 더 작게 나온 것으로 해석할 수 있다. 최근에 보고되는 고풍력 Nd:YAG 레이저의 기울기 효율이 약 50% 정도임을 고려하면^[22] 간단한 여기 구조를 도입하였음에도 펄프 헤드의 특성이 우수함을 확인할 수 있다. 흡수 분포의 균일성을 더 증가시키기 위해 3방향 이상의 측면 여기방식을 취하면 더 높은 효율을 기대할 수 있을 것으로 예측된다.

V. 열렌즈 특성

레이저의 출력이 열렌즈 효과에 의하여 심각하게 영향받으므로 열렌즈 효과를 정확하게 측정하는 것이 매우 중요하다.

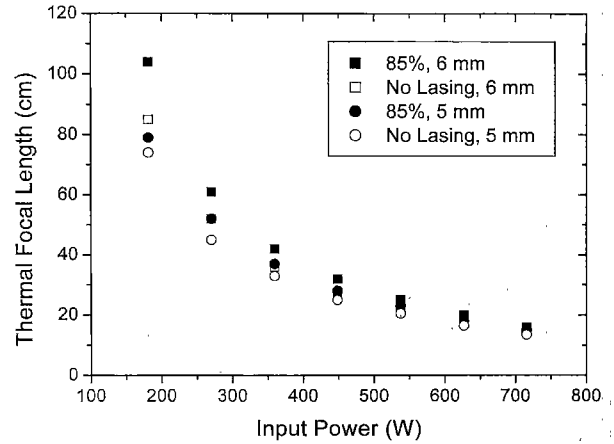


그림 5. 다이오드 출력에 따른 레이저봉의 열렌즈 초점거리의 변화.

따라서 다이오드 여기광의 세기에 따른 열렌즈 특성을 측정할 필요가 있다. 열렌즈를 측정하기 위하여 He-Ne 레이저빔을 확대한 다음, 다이오드 레이저에 의하여 여기되고 있는 레이저봉에 보낸다. 다이오드 출력을 입사시키지 않으면 He-Ne 레이저빔은 크기의 변화가 없이 진행하나, 입사 출력이 증가하면서 점점 집중된다. 집중된 빔의 직경을 CCD 카메라로 측정하면서 빔 직경이 최소가 되는 위치를 측정하였고 그 결과가 그림 5에 나타나 있다. 열렌즈 효과는 레이저가 발진하는 조건에서 측정한 값과 발진하지 않는 경우에 측정한 값이 다르다. 발진하는 경우는 여기된 레이저 이득매질에서 레이저 출력으로 여기에너지가 유출되므로 열렌즈 효과가 감소한다. 6 mm 레이저봉을 이용하고 85% 출력경을 사용하였을 경우, 150 W 입사 출력에서는 약 105 cm인 초점 거리가 700 W 입사 출력에서 17 cm 근처로 줄었음을 볼 수 있다. 출력경을 제거하고 레이저 발진을 시키지 않았을 경우에는 150 W 입사 출력에서 85 cm, 700 W 입사 출력에서 15 cm로 약 20% 정도 초점 거리가 줄어들음을 보여준다. 반면 5 mm 레이저봉을 이용하고 85% 출력경을 사용하였을 경우에는, 150 W 입사 출력에서 약 80 cm 초점 거리가 700 W 입사 출력에서 15 cm로 줄었다. 이 경우 레이저 발진을 시키지 않았을 경우에는 700 W 입사 출력에서 약 13.5 cm로 줄어든 초점 거리를 보인다. 초점 거리의 역수를 diopter 단위로 표시한 다음에 fitting을 통하여 입사 출력에 대한 기울기를 계산하였다. 측정한 기울기 값은 6 mm 레이저봉의 경우, 85% 출력경을 사용하여 발진시켰을 때에는 9.7 D/kW, 발진시키지 않을 때에는 10.2 D/kW이었다. 한편 5 mm 레이저봉의 경우, 발진시켰을 때의 기울기 값은 약 10.0 D/kW로 6 mm 레이저봉과 거의 비슷한 결과를 보여주었다. 균일하게 레이저봉이 여기되었을 경우의 기울기 값은 레이저봉의 단면적에 반비례한다. 따라서 6 mm 레이저봉의 경우와 비교하여 5 mm 레이저봉의 흡수 분포는 매우 균일함을 이 열렌즈 특성 결과로부터도 알 수 있다.

최근, D. Golla등이 9방향에서 4 mm지름의 Nd:YAG봉에 균일하게 펄핑하여 얻은 15.4 D/kW와 비교하여 우리가 5 mm 봉에서 얻은 10 D/kW는 레이저봉의 크기효과를 고려할 때 거의 비슷한 값을 보아 3방향에서 여기시켰음에도 매우 균일

한 흡수 분포를 보인다는 것을 알 수 있다.^[23] 초점 거리의 역수와 여기광의 세기의 관계는 선형관계에서 약간 벗어나는 곡선을 그리는 데 이는 다이오드 전류를 증가하면 다이오드 파장이 장파장 쪽으로 이동하면서 레이저봉의 흡수계수가 증가하므로 초점거리 역수와 여기광 출력의 관계가 약간 선형관계에서 벗어나는 사실에 기인한다. $1/f$ 가 0이 되는 여기광의 세기도 약 100 W로서 offset이 발생하게 되는데, 그 원인도 파장의 변화에 따른 흡수효율의 변화로 이해된다. 참고문헌 19에서도 이와 같은 사실이 지적되었고, 누설광 세기 분석 방법에 의해 측정된 흡수 여기광의 세기에 대한 $1/f$ 가 선형관계를 보이고 offset이 없다는 결과를 얻었으며, 이로부터 다이오드 파장의 변화에 따른 흡수 효율의 증가가 그 원인으로 이해된 바 있다.

VI. 레이저빔의 빔질 특성

전반사경과 출력경만으로 공진기를 가장 간단하게 구성한 다음, 레이저빔의 공간적인 모양을 CCD 카메라로 측정한 결과가 그림 6에 나타나 있다. 이 때 사용된 레이저봉은 5 mm 직경이었고, 레이저빔은 15 cm의 초점거리를 갖는 렌즈로 집속되어 CCD 픽셀에 이미징 되도록 하였다. 레이저빔의 전체적인 모양은 가운데가 약간 세고 가장자리로 갈 수록 약간 감소되는 형태를 보여준다. 레이저빔의 공간적인 모양은 레이저봉 내부에서 여기광에 의한 형광 분포와 공진기의 구조, 출력경의 반사율에 크게 의존한다. 여기광에 의한 형광분포는 다이오드 레이저의 배치와 빔의 전달 구조, 레이저봉에서의 Nd 농도, 봉의 직경, 반사체의 특성과 구조 등에 의하여 결정된다. 공진기의 구조는 발진 가능한 레이저 공간모드를 결정하므로 레이저의 공간적 모양에 영향을 미친다. 공진기 거울과 출력경의 곡률, 핀홀(pin hole) 등의 공간 필터, 공진기 내부에 위치한 Q-switching 소자등이 공진기 구조를 결정한다. 본 실험에서와 같이 비교적 간단한 공진기의 경우, 레이저 이득매질에서의 형광분포에 의한 공간적 모양이 가장 큰 영향을 미친다. 측정된 레이저빔의 분포는 형광분포와 거의 비슷한 분포

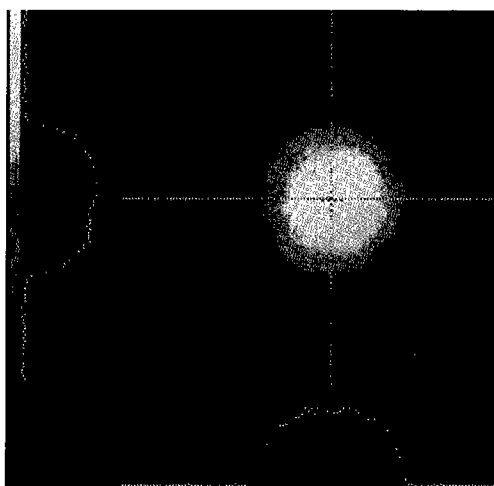


그림 6. 레이저빔의 공간적 모양(5 mm 레이저봉인 경우).

를 보여준다. 6 mm 직경의 레이저봉을 사용하였을 경우에는 형광분포보다 레이저빔의 균일도가 더 우수하게 측정되었다. 이는 레이저 발진 과정에서 이득에 의한 증폭을 거치면서 비선형적으로 레이저 출력이 증가하고 이에 따라서 이득이 포화된 중심부의 출력증가는 둔해지며 가장자리의 출력이 보다 증가해진 결과, 형광분포에 비하여 균일도가 개선된 것으로 여겨진다.

레이저빔의 질은 빔질상수(beam quality factor) M^2 를 측정하여 판단할 수 있다. 레이저빔의 반경 $\omega(z)$ 는 공진기로부터 다음과 같은 진행방정식을 만족한다고 가정할 수 있다.

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

여기서 ω_0 는 출력경(혹은 초점)에서의 빔반경(spot size), z 는 출력경으로부터 빔 진행거리를 나타낸다. 본 실험에서는 레이저빔을 초점거리 15 cm 렌즈로 집속한 다음, 진행거리 z 에 따른 빔의 직경을 CCD 카메라로 측정하여 위의 식으로부터 M^2 를 계산하였다. 빔이 진행됨에 따라 빔반경은 줄어들었다가 다시 확대되는 형태로 관측된다. 따라서 CCD 픽셀의 포화가 일어나 실제 빔반경이 크게 측정될 수 있기 때문에 ND 필터를 적절히 사용하여 항상 빔세기가 일정하게 조절하였다. 열 렌즈는 레이저봉에 가해진 열부하에 크게 의존한다. 따라서 다이오드 레이저의 출력을 변화시키면서 M^2 를 각각 측정하였다.

여기광의 출력을 100 W에서 1000 W까지 증가시키면서 이상의 방법으로 M^2 를 측정한 결과가 그림 7에 나와 있다. 이 경우 공진기 길이는 27 cm였고 사용한 레이저봉의 직경은 각각 5 mm, 6 mm였다. 다이오드 출력이 증가하면 M^2 값도 증가한다. 6 mm (5 mm) 레이저봉의 경우, 다이오드 출력이 100 W일 때, 약 25인 M^2 는 다이오드 출력이 최대 여기광 출력인 1000 W가 되면 85(70)까지 증가한다. 6 mm 레이저봉의 M^2 가 5 mm 레이저봉의 M^2 보다 큰 것은 당연하다. 두 경우에 열렌즈 특성은 거의 비슷하게 측정되었고 따라서 흡수 분포가 균일하다면 M^2 는 레이저봉의 단면적의 비로 예측된다. 그러나 실제 측정에서는 레이저봉 단면적 비보다 훨씬 작게 측정되었

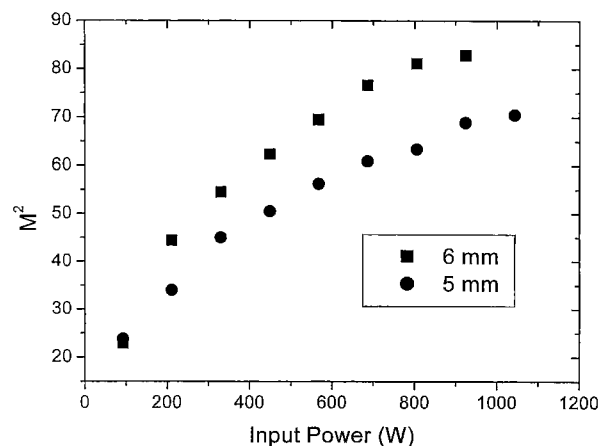


그림 7. 여기광의 세기에 따른 레이저빔의 빔질 변화.

는데, 이는 6 mm 레이저봉의 형광분포가 가운데 부분이 강하므로 가장자리 부분의 영향이 적게 미쳤기 때문으로 해석할 수 있다. 그림 5에서부터 구한 레이저봉의 열렌즈 효과를 고려하고 레이저봉에 다이오드 출력이 균일하게 흡수된다고 가정하여 레이저봉에서의 TEM₀₀ 모드의 크기를 계산한 후 레이저봉의 지름과 비교하여 도출해 낸 M² 값과 비교해 보면, 흡수 분포가 상당히 균일한 5 mm 레이저봉의 경우에도 그 측정치는 계산된 값보다 작다. 즉 다이오드 출력이 1,000 W일 때 계산된 M²는 약 90이었으나, 측정된 값은 약 70이었다. 이는 그림 6에서 살펴보았듯이 레이저빔이 완전히 균일한 분포가 아니기 때문에 계산값보다 측정값이 작게 나온 것으로 이해할 수 있다.

VII. 결 론

난반사체를 사용하여 자체 제작한 다이오드 측면여기 Nd:YAG 레이저의 동작 특성을 조사하여 공진기 길이, 출력경의 반사율, 열렌즈 특성 등이 레이저 발전 특성에 미치는 영향등에 관해 조사하였다. 난반사체에 나 있는 폭 1.3 mm의 슬릿을 통해 다이오드 여기광이 직접 반사체 내부로 전송되는 구조를 갖는 고휘력 레이저 헤드를 설계 제작하였다. 흡수분포를 유지하기 위해 레이저봉의 직경에 따른 형광분포의 균일도를 조사하였으며, 본 연구에서 설계된 여기 구조에서는 레이저봉의 직경이 5 mm 근처에서 최적 조건을 만족함을 확인할 수 있었다. 선형 공진기를 구성하였을 때 연속모드의 출력은 1070 W 여기서, 85% 반사율의 출력경을 사용하고 5 mm 레이저봉을 사용하여 500 W를 얻을 수 있었다. 이 때 기율기 효율은 49%였고, 광변환 효율은 46.7%로 매우 높았다. 6 mm 레이저봉을 사용하였을 때에는 최대 출력은 410 W로 감소하였으며 이는 흡수분포의 불균일성의 증가로 해석할 수 있었다. 레이저봉의 열렌즈 특성을 나타내는 초점거리의 역수의 다이오드 출력에 대한 기율기는 5 mm 레이저봉의 경우 흡수 분포의 균일성에 의해 약 10 D/kW로 상당히 작게 측정되었다. 발생된 레이저빔의 빔질은 5 mm 레이저봉의 경우 최대 출력에서 약 70 정도였고 6 mm 레이저봉의 경우에는 85 정도로 약간 큰 값을 가졌으며 공진기 길이를 증가시키면 더 줄일 수 있을 것이다.

본 연구에서 사용한 난반사체 직접여기 구조로도 매우 높은 효율을 갖는 고휘력 레이저를 실현할 수 있었으므로 난반사체를 이용한 측면여기 구조가 고휘력 레이저에 매우 적합하다고 결론지을 수 있다. 본 연구에서는 난반사체에 나 있는 슬릿의 폭이 1.3 mm로 큰 편이었는데 이를 0.7 mm 정도로 줄인다면 흡수 효율의 증가로 증대된 레이저 출력을 얻을 수 있을 것이다. 난반사체의 적은 흡수로 인해 난반사체의 온도는 약간 올라갔지만 난반사체 결합 구조가 깨질 온도에는 훨씬 미치지 못했다. 이로부터 5방향 이상으로 여기원을 늘릴 경

우에도 능동적으로 생각되지 않는 난반사체의 열적 안정성이 깨지지 않을 것이라고 예측할 수 있다. 따라서 5방향 이상의 난반사체 여기구조는 효율이 더욱 증가하고 흡수분포의 균일도가 향상된 고휘력 레이저를 구현할 수 있으리라 기대된다.

참고문헌

- [1] Y. Kaneda, M. Oka, H. Masuda, and S. Kubota, *Opt. Lett.* **17**, 1003 (1992).
- [2] S. C. Tidwell, J. F. Seamans, and M. S. Bowers, *Opt. Lett.* **18**, 116 (1993).
- [3] I. Freitag, A. Tünnermann, and H. Welling, *Opt. Commun.* **115**, 511 (1995).
- [4] W. A. Clarkson and D. C. Hanna, *Opt. Lett.* **21**, 869 (1996).
- [5] D. Golla, M. Bode, S. Knoke, W. Schöne, and A. Tünnermann, *Opt. Lett.* **21**, 210 (1996).
- [6] D. Golla, S. Knoke, W. Schöne, G. Erst, M. Bode, A. Tünnermann, and H. Welling, *Opt. Lett.* **20**, 1148 (1995).
- [7] S. Konno, S. Fujikawa, and K. Yasui, *Appl. Phys. Lett.* **70**, 2650 (1997).
- [8] J. Lee, H. J. Moon, and J. Yi, *J. Opt. Soc. Kor.* **2**, 5 (1998).
- [9] Y. Hirano, Y. Koyata, S. Yamamoto, K. Kasahara, and T. Tajime, *Opt. Lett.* **24**, 679 (1999).
- [10] B. J. Le Garrec, G. J. Raz, P. Y. Thro, and M. Gilbert, *Opt. Lett.* **21**, 1990 (1996).
- [11] J. J. Chang, E. P. Dragon, and I. L. Bass, *CLEO'98, CPD2-1-CPD2* (1998).
- [12] S. Lee, S. K. Kim, J. Yun, B. H. Cha, and J. Lee, *J. Kor. Phys. Soc.* **35**, 268 (1999).
- [13] N. Pavel, Y. Hirano, S. Yamamoto, Y. Koyata, and T. Tajime, *Appl. Opt.* **39**, 986 (2000).
- [14] S. Konno, T. Kojima, S. Fujikawa, and K. Yasui, *Opt. Lett.* **25**, 105 (2000).
- [15] T. Kojima and K. Yasui, *Appl. Opt.* **36**, 4981 (1997).
- [16] 이종민, 문희중, 이종훈, 한재민, 이용주, *한국광학회지* **9**, 186 (1998).
- [17] J. Lee, H. J. Moon, J. Yi, S. Lee, and B. H. Cha, *Jpn. J. Appl. Phys.* **38**, 2769 (1999).
- [18] H. J. Moon, J. Yi, Y. Rhee, B. H. Cha, and J. Lee, *J. Kor. Phys. Soc.* **35**, 254 (1999).
- [19] H. J. Moon, J. Yi, J. Han, B. H. Cha, and J. Lee, *Appl. Opt.* **38**, 1772 (1999).
- [20] H. J. Moon, J. Yi, J. Han, Y. Rhee, J. Lee, and K. S. Kim, *J. Kor. Phys. Soc.* **33**, 400 (1998).
- [21] J. Lee, H. J. Moon, J. Yi, and B. H. Cha, *Jpn. J. Appl. Phys.* **38**, L315 (1999).
- [22] T. Takase, Y. Akiyama, A. Takada, H. Yuasa, and N. Nishida, *CLEO-Technical Digest*, 198 (2000).
- [23] D. Golla, S. Knoke, W. Schöne, A. Tünnermann, and H. Schmidt, *Appl. Phys. B* **58**, 389 (1994).

Operation characteristics of a diode side-pumped, high power Nd:YAG laser

Hee-Jong Moon[†], Sungman Lee, Hyun Su Kim, Do-Kyeong Ko, Byungheon Cha, and Jongmin Lee

Laboratory for Quantum Optics, Korea Atomic Energy Research Institute, Taejon 305-600, KOREA

[†]*E-mail: hjmoon@kaeri.re.kr*

Jonghoon Yi

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

(Received September 15, 2000 ; Revised manuscript received October 17, 2000)

We fabricated a high power Nd:YAG laser pumped by a 1 kW diode laser with a Lambertian-type diffusive reflector. Maximum cw power of 500 W with a slope efficiency of 49%, which corresponds to an optical efficiency of 46.7%, was obtained from a short linear resonator when a 5 mm rod was used. The efficiencies decreased when a 6 mm rod was used, due to the poor quality of the absorption distribution in the rod. The measured beam quality factor of 70, which is slightly smaller than the value calculated from the measured thermal focal lengths, shows that the absorption distribution in the rod is fairly uniform.

OCIS codes : 140.2020, 140.3460, 140.3530, 140.3580.