

Ar⁺ 레이저로 펌핑되는 Nd:glass 레이저의 발진특성*

이종무 · 강응철 · 남창희

한국과학기술원 물리학과

(1992년 11월 18일 받음)

Ar⁺ 레이저로 펌핑되는 Nd:glass 레이저를 제작하여 그 특성을 조사하였다. 레이저 공진기는 오목거울 두 개와 98% 고반사 평면경, 그리고 Brewster 각도로 놓인 Nd:glass의 이득 매질로 구성되었으며, 효율적인 펌핑을 위해서 Ar⁺ 레이저 광선을 공진기 길이 방향으로 입사하여 공진모우드의 beam waist에서 초점이 맺히도록 하였다. Nd:glass의 열전도도가 작아서 흡수된 펌핑빔에 의해 생성된 잔열로 인한 매질의 손상이 우려되기 때문에 mechanical chopper로 펌핑빔을 100 Hz로 끊어서 입사하여 잔열의 생성을 줄였다. 1.5 W로 펌핑될 때 Nd:glass 레이저의 출력은 70 mW이었고 발진이 되는 문턱에서의 펌핑파워는 520 mW이었으며, slope efficiency는 7.4%이었다.

I. 서 론

일반적으로 고체 레이저는 섬광등 펌핑과 같이 외부에서 가해진 빛 에너지가 증폭매질에 의해 흡수되어 발진에 필요한 밀도반전을 얻는다. 공진기의 구조에 따라서 레이저 모우드가 증폭매질의 전 부위를 포함하는 경우가 있는 반면, 낮은 펌핑파워에서 발진하기 위해 공진기내의 초점이 맺히는 곳에 매질이 놓여져서 레이저 모우드가 매질의 일부분만을 통과하는 경우가 있다. 후자의 경우 섬광등 펌핑을 쓰게 되면 매질내의 레이저 모우드가 통과하는 부위뿐만 아니라 매질의 전 부위에 펌핑빔이 흡수되며 섬광등에서 발진에 적합한 파장 이외의 다른 여러 파장의 빛이 함께 방출되기 때문에, 펌핑효율이 낮아지고 불필요한 잔열을 생성하게 된다. 매질내에 축적된 잔열은 매질의 손상과 thermal birefringence 및 thermal lensing 등의 문제를 야기한다.^[1] 그러므로, 매질에 흡수율이 좋은 파장의 단색광원 즉 레이저 광을 발진하려는 레이저모우드와 일치되도록 공진기 길이방향으로 입사하여 펌핑함으로써 섬광등 펌핑에 비해서 펌핑효율이 높고 잔열문제가 줄어든 연속발진 고체 레이저를 만들 수 있다.^[1,8]

Nd:glass는 결정에 Nd가 도핑된 레이저 매질(Nd: YLF, Nd: YAG 등)보다 열전도도가 10 배 정도 낮아서 위에서 언급된 열문제가 심각하나, 발진파장의 선폭이

넓어서 극초단 펄스를 얻는데 유리하고 고출력화를 위한 증폭단의 설치에 적합하다는 이점 때문에 극초단 또는 고출력 레이저 시스템의 레이저 매질로 많이 사용되고 있다.^[9]

본 연구에서는 Ar⁺ 레이저로 펌핑되는 접힌 공진기 형태의 준연속발진(quasi-cw) Nd:glass 레이저를 발진시키고 공진기 안정조건을 만족시키는 범위에서 공진기 구성 요소들의 위치를 조절하여 적절한 공진기를 구성한 후 펌핑 power에 따른 출력변화를 관찰하였다. 제 2 절에서는 접힌 공진기의 이론적 해석을, 그리고 제 3 절에서는 발진된 Nd:glass 레이저의 출력특성을 기술하고, 마지막 절에서는 앞으로 보완해야 할 점을 논의한다.

II. 접힌 레이저 공진기의 이론적 해석

공진기 길이방향으로 펌핑되는 레이저는 비교적 낮은 문턱 에너지에서 발진하기 위해 펌핑광선과 공진모우드의 초점이 매질내에 위치하도록 한다. 따라서 대개의 레이저로 펌핑되는 공진기는 펌핑광선을 집광하는 볼록렌즈와 공진기내에 초점을 맺게하는 고반사 오목거울과 평면경의 조합으로 이루어진다. 그림 1(a)는 두개의 오목거울과 하나의 평면경으로 이루어진 접힌 공진기이다. 공진기를 접는 이유는 적당한 각도로 접힌 공진기는 Brewster 각으로 놓인 레이저 매질에서 생기는 비접수

* 본 연구는 1992년도 국방과학연구소 기초연구의 일부 지원에 의한 것임.

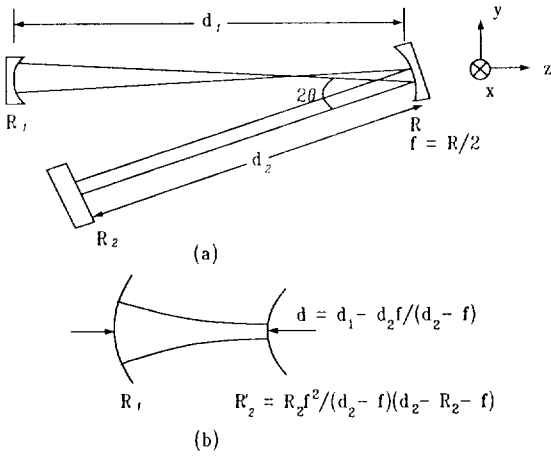


그림 1. (a) Layout of a folded cavity and (b) the equivalent cavity of (a).

차를 보상할 수 있기 때문이다.

그림 1(b)는 공진기 해석의 편의를 위해서, 그림 1(a)의 평면경이 오목거울에 의해 맺히는 상의 위치 및 곡률을 결상법칙에 따라 계산하여 두개의 거울로 이루어진 등가의 공진기로 단순화한 것이다. 결상법칙에 따르면 기울기 거리는

$$d = d_1 - d_2 f / (d_2 - f), \quad (1)$$

이고, 곡률반경은

$$R'_2 = R_2 f^2 / (d_2 - f)(d_2 - R_2 - f) \quad (2)$$

이다.^[10]

공진모우드의 beam waist의 반경이 작은 small spot 공진기에서는 거리 d_1 이 중요해서 $d_1 = R_1 + f$ 가까이에서만 안정 조건을 만족한다. 따라서 조절거리 δ 를

$$d_1 = R_1 + f + \delta \quad (3)$$

로 정의하는 것이 편리하다.

이때 공진기의 안정조건은 다음과 같이 구해진다.

$$0 \leq g_1 g_2 \leq 1 \quad (4)$$

여기서,

$$g_1 = 1 - d/R_1, \quad (5)$$

$$g_2 = 1 - d/R'_2 \quad (6)$$

이다.^[9, 10] δ 의 최소치와 최대치는

$$\delta_{min} = f^2 / (d_2 - R_2 - f), \quad (7)$$

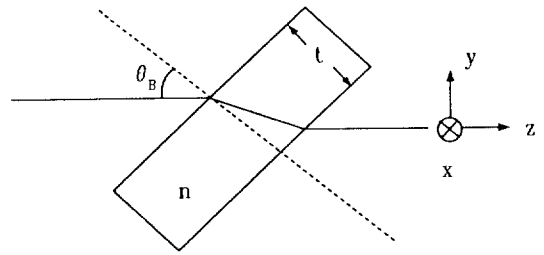


그림 2. Geometry of Brewster-angle cell.

$$\delta_{min} = f^2 / (d_2 - f), \quad (8)$$

이며, 그림 1(a)에서 처럼 R_2 가 무한히 큰 경우에 $\delta_{min} = 0$ 이다.^[10]

TEM₀₀ 모우드의 beam waist에서 모우드의 반경, ω_0 는

$$\left(\frac{\pi \omega_0^2}{\lambda} \right)^2 = \frac{d(R_1 + d)(R'_2 - d)(R_1 + R_2 - d)}{(R_1 + R_2 - 2d)^2} \quad (9)$$

이고, 거울 R_1 으로부터 beam waist 까지의 거리를 s 라 할 때,

$$s = d(R'_2 - d) / (R_1 + R'_2 - 2d) \quad (10)$$

이다.^[10]

이러한 변수들 즉 모우드의 beam waist 크기 및 위치는 오목 거울의 곡률과 펌핑빔의 focusing lens의 선택 등 공진기를 구성하는데 필요한 중요한 자료가 된다.

그림 2는 Brewster-angle cell에 광선이 입사하는 것을 보여주는데 x - z 평면을 sagittal plane이라 하고 y - z 를 tangential plane이라 한다. 광선을 집속할 때 공기 중에서의 거리로 치환한 등가거리는 비점수차에 의해 각 plane에 따라 달라지며, 그것은 다음과 같이 구해진다.^[10, 11]

$$d_x = t \frac{\sqrt{n^2 + 1}}{n^2} \quad (11)$$

$$d_y = t \frac{\sqrt{n^2 + 1}}{n^4} \quad (12)$$

그리고 초점거리 f 인 거울에 각도 θ 로 입사할 때는

$$f_x = f \cos \theta \quad (13)$$

$$f_y = f \cdot \cos \theta \quad (14)$$

이다. 따라서 집힌 공진기에서는 sagittal plane과 tangential plane에서 beam waist의 위치가 일반적으로 서로 다르다. 공진기내에 Brewster-angle cell이 있을 때에는 오목거울을 다음 식을 만족하도록 θ 로 틀어서 비점수차

를 보상해야 펌핑효율을 높이고, 안정된 공진기를 형성할 수 있다.¹⁰⁾

$$t(n^2-1)\sqrt{n^2+1/n^4} = fsin\theta\tan\theta \quad (15)$$

III. Nd:glass 레이저의 발진

Nd:glass는 514 nm에서 비교적 흡수율이 좋아서, Ar⁺ 레이저로 펌핑이 가능하다.¹¹⁾ 길이 10 mm Nd:glass (Schott LG760, Nd doping rate 4%)의 파장 514 nm의 Ar⁺ 레이저 광선에 대한 흡수율을 측정해본 결과 약 90%가 흡수되어 2 mm 두께에 10 mm×15 mm인 Nd:glass를 레이저 매질로 사용하였다.

공진기는 그림 3과 같이 두개의 곡률 474 mm의 1054 nm용 오목 거울(M₁, M₂)과 98% 고반사 평면경(M₃)으로 이루어졌고, Ar⁺ 레이저 광선을 공진기의 발진 모우드와 같은 방향으로 입사하여 공진모우드의 초점에서 펌핑빔의 초점이 맺히도록 했다. 공진기의 총 길이는 조절거리 δ가 0일 때 약 130 cm가 되도록 하였다. Nd:glass 매질은 Brewster 각도로 하여 공진기 내의 초점 위치에 놓였다. 그리고 Brewster 각도로 인해 생기는 비점수차를 보상하기 위하여 식 (15)로부터 구해진 16°로 접힌 공진기를 형성하였다. 잔열로 인한 매질의 손상을 막기 위하여 Nd:glass slab을 aluminium block 위에 놓고 block 안으로는 물을 순환시켜 냉각을 시켰다.

섬광등 펌핑이 아닌 레이저 증모우드 펌핑 방법을 쓰고, 간단한 냉각 장치를 구성해서 잔열의 발생을 줄였지만 Nd:glass의 열전도성이 너무 나빠서 열로인한 문제를 완전히 극복할 수는 없었다. 1.5 W Ar⁺ 레이저 펌핑빔이

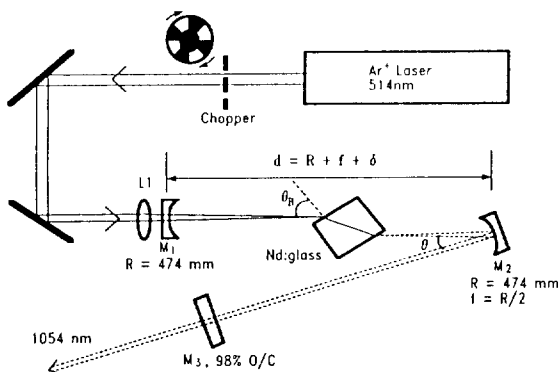


그림 3. Experimental Layout of Ar-ion laser pumped Nd:glass laser.

L1, 317 mm focusing lens; θ_B , Brewster angle; θ , astigmatism compensation angle(16 degree);

연속으로 입사되었을 때 잔열의 발생으로 유도된 thermal stress에 의해 매질이 쉽게 손상을 입고 레이저 발진도 쉽지 않았다. 이러한 문제를 해소하기 위해 일정한 간격으로 구멍이 있어 회전을 하면 펌핑빔을 반 주기 동안은 통과시키고 반 주기 동안은 차단하는 mechanical chopper를 사용하여 잔열을 반으로 줄이고 펌핑빔이 입사되는 동안에만 발진하는 레이저를 구성하여 그 특성을 알아보았다. 본 실험에서 얻어진 자료를 토대로 완전한 연속발진 Nd:glass 레이저가 곧 만들어질 것이다.

레이저가 100 Hz의 주기로 동작할 때의 발진특성은 다음과 같다. 가장 적절한 공진조건을 찾기위해 오목거울 M₁과 출력경 M₃는 고정하고 오목거울 M₂의 위치를 변화시켜 공진기의 조절거리 δ의 변화에 따른 출력의 변화를 관찰하여 그림 4와 같은 결과를 볼 수 있었다. 펌핑빔의 초점에서 chopper를 회전시키며 통과되는 빔의 출력을 oscilloscope가 연결된 detector로 받아서 chopper가 열려서 빔이 완전히 통과할 때까지 걸리는 시간 즉 rise time을 측정하여 추정한 초점에서의 펌핑빔 spot size가 약 120 μm이었다. 이것을 고려하여, 그림 4의 실험 데이터와 레이저 모우드의 beam waist size를 비교하면, 공진 모우드의 크기가 펌핑빔의 것과 차이가 큰 중앙 부분 및 양 끝에서는 출력이 낮는데 반해 크기가 일치하는 부분에서는 출력이 높다. 따라서 출력 효율을 높이기 위해서는 공진모우드와 펌핑광선간의 정합이 이루어져야 함을 알 수 있다.

그림 4를 보면 좌우가 비대칭으로 δ가 클 때 출력이 높은 것을 볼 수 있다. 그리고 공진기의 오정렬에 대해서도 δ가 클 때가 훨씬 안정되게 발진되었다. 이러한

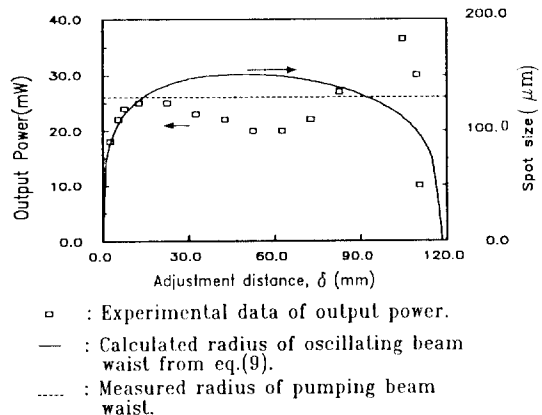


그림 4. Output powers and radius of beam waist at different adjustment distance. (input power=1.5 W).

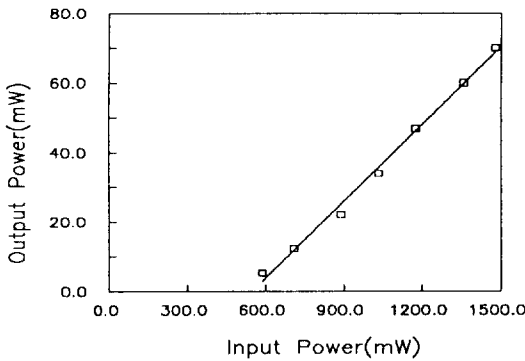


그림 5. Output powers at different pumping levels.

현상은 수 차례 거듭된 실험에서 항상 나타났으나, 이유를 이해하지 못하고 있다. 조절거리를 변화시키는 도중 공진기의 접힌 각도가 변해서 비점수차에 의한 손실이 커진 것으로 생각할 수도 있으나, 접힌 각도의 변화에 따른 출력을 관찰한 결과 비점수차 보상각의 변화에 따른 출력의 변화는 극히 미세했다. 이는 Nd:glass의 크기가 작고 펌핑빔의 대부분이 매질의 전단부에서 흡수되어서 비점수차가 크지 않기 때문으로 보인다.

펌핑 power에 따른 출력의 변화를 측정된 결과가 그림 5와 같다. 그림에서 보듯이 1.5 W로 펌핑될때 Nd:glass 레이저의 출력은 70 mW이었고 발진이 되는 문턱에서의 펌핑파워는 520 mW이었으며, slope efficiency는 7.4%이었다.

IV. 결 론

Ar⁺ 레이저로 펌핑되는 접힌 공진기 형태의 준연속 발진 Nd:glass 레이저를 만들어 그 특성을 조사하였다. 간단한 냉각 장치를 구성해서 잔열의 발생을 줄였지만 잔열로 인해 매질이 손상되는 문제가 발생해서, 100 Hz로 chopping하는 mechanical chopper를 사용하여 잔열을 반으로 줄이고 펌핑빔이 입사되는 동안에만 발진하는 레이저를 구성하였다. 1.5 W로 펌핑될때 Nd:glass 레이저의 출력은 70 mW이었고 발진이 되는 문턱에서의 펌핑파워는 520 mW이었으며, slope efficiency는 7.4%이었다. 오목거울간의 거리에 따른 출력변화를 관찰해서, 펌핑광선과 공진모우드의 정합이 이루어지는 거리에서 출력

이 높아짐을 확인했다. 앞으로 몇 가지 문제점을 보완 하면 효율이 더욱 좋아질 것으로 보이며, 그 문제점과 대책은 다음과 같다. 본 실험에 쓰인 Nd:glass의 Neodymium doping rate가 4%로 비교적 높아 단위 체적당 열생성량이 많고, Brewster 각으로 놓인 Nd:glass가 편 극소자의 역할을 해서 thermal birefringence에 의한 손실이 커진 것으로 보인다. 따라서 무반사 coating이 되고 doping rate가 2% 정도로 낮은 Nd:glass에 공진 빔이 수직으로 입사되도록 해서 잔열로 인한 손실을 줄여야 한다.

본 실험의 결과는 본 레이저 시스템과 유사한 diode 레이저로 펌핑되는 Nd:YLF 레이저의 개발 등에 응용 될 것이며,^{[1,5,6]}} 앞으로는 광섬유로 이루어진 외부공진기를 연결해서 극초단 펄스를 생성하는 Additive Pulse Modelocking^{[6,7]}} 실험을 할 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] D. W. Hughes and J. R. M. Barr, J. Phys. D: Appl. Phys. **25**, 563 (1992).
- [2] Li Yan, Jun-Da Ling, P.-T. Ho, Chi H. Lee, and G. L. Burdge, IEEE J. Quantum Electron. **QE-24**, 418 (1988).
- [3] Li Yan, P.-T. Ho, C. H. Lee, and G. L. Burdge, IEEE J. Quantum Electron. **QE-25**, 2431 (1989).
- [4] D. W. Hughes, M. W. Phillips, J. R. M. Barr, and D. C. Hanna, IEEE J. Quantum Electron. **QE-28**, 1010 (1992).
- [5] G.P.A. Malcolm and A. I. Ferguson, J. Opt. Soc. Am. **16**, 1967, (1991).
- [6] Ch. Spielmann, F. Krauz, T. Brabec, E. Winter, and A. J. Schmidt, Appl. Phys. Lett. **58**, 2470 (1991).
- [7] Ch. Spielmann, F. Krauz, T. Brabec, E. Winter, and A. J. Schmidt, IEEE J. Quantum Electron. **QE-27**, 1207 (1991).
- [8] 윤태현, 김용평, 조재홍, 새물리 **31**, 671 (1991).
- [9] W. Koechner, *Solid-State Laser Engineering* (Springer-Verlag, New York, 1976).
- [10] H. W. Kogelnik, E. P. Ippen, A. Dienes, and C. V. Shank, IEEE J. Quantum Electron. **QE-8**, 373 (1972).
- [11] H. Kogelnik, Bell Syst. Tech. J. **44**, 455 (1965).

**Investigation on the lasing characteristics of an
Ar⁺ laser-pumped Nd:glass laser**

J. M. Lee, E. C. Kang, and C. H. Nam

Dept. of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejon 305-701, Korea

(Received: November 18, 1992)

The lasing characteristics of a Nd:phosphate glass laser pumped by 514 nm of an Ar⁺ laser has been investigated. The oscillator consists of a Nd:glass gain medium set at Brewster angle, and two concave mirrors, and a flat mirror with a reflectance of 98%. The Ar⁺ laser pumping beam is focused longitudinally at the beam waist of laser mode for efficient pumping. The pumping beam is chopped at 100 Hz to reduce the heat loading to prevent the thermal damage of the gain medium by the latent heat from the absorbed pumping beam. The maximum laser output power of 70 mW at 1.5 W pumping and the threshold input power of 520 mW have been obtained.