

공초점 불안정공진기 구리증기레이저의 출력특성

정지철 · 유명태

조선대학교 정밀기계공학과

윤재순 · 백세종 · 임기건

전남대학교 물리학과

(1998년 12월 7일 받음, 1999년 5월 6일 수정본 받음)

레이저선속의 퍼짐각을 개선하기 위하여 공진기 내부에 선속분할기를 갖는 양영역 공초점 불안정공진기 구리증기레이저를 구성하였다. 기하광학적 배율 $M=30$ 인 공진기에서 0.15 mrad의 최소 퍼짐각을 얻었고, $M=60$ 인 공진기를 사용하여 0.1 mrad의 값을 얻을 수 있었다. 퍼짐각 개선과 관련하여 상대적인 원거리 출력밀도가 최대 130배 증가된 레이저 출력을 얻을 수 있었으며, 자체잡김현상을 보이는 펄스 형태의 레이저 발진이 관측되었다.

I. 서 론

구리증기레이저를 펄핑광원으로 사용하는 Ti:sapphire 레이저 장치의 발진 연구가 시행되었고, 변환효율의 증대를 위하여 펄핑펄스에너지의 증가와 불안정공진기의 활용이 제시된 바 있다.^[1] 레이저 가공분야는 보다 다양한 파장에서 퍼짐각(beam divergence)이 작고 출력의 근거리장(near-field) 또는 원거리장(far-field)의 횡적강도분포가 우수한 고출력 레이저 장치를 요구하고 있다. 최근에는 가시광선 영역의 발진파장, 짧은 펄스 길이와 고반복률 고출력 특성을 갖는 구리증기레이저의 기계 가공 영역에 서의 활용이 확대되고 있으며,^[2,3] 가공의 정밀도를 더욱 높이기 위해 구리증기레이저의 출력선속 개선이 요구되고 있다.

구리증기레이저의 높은 이득율과 관련하여 공진기 형태는 흔히 반사율 99% 이상의 평면 반사경과 4% 또는 8% 반사율을 갖는 부분반사 평면경으로 구성된 평행평판(plane-parallel) 공진기가 주로 사용된다. 이 경우, 레이저의 출력은 여러 횡모드(transverse modes)를 포함하게 되어 퍼짐각은 회절한계각(diffraction-limited angle)의 수십 배의 크기가 되며 초점에 집중된 광속은 단면이 커서 출력밀도는 상대적으로 작은 값을 갖는다.

구리증기레이저 출력선속의 퍼짐각을 줄임으로서 초평면에 집중된 광의 분포 및 조도를 개선하기 위한 연구가 1970년대 후반에 시작되었고, 불안정공진기를 활용한 레이저에서 회절한계의 퍼짐각을 갖는 레이저 출력이 보고되었다.^[4,5] 출력과 횡적강도분포 특성을 고려한 몇몇 공진기 형태들이 소개되었고,^[6] 공진기를 구성함에 없이 후면 반사경에 의한 ASE (Amplified Spontaneous Emission) 출력으로 강도분포를 개선하는 연구도 발표되었다.^[7]

기존의 불안정공진기 구리증기레이저 장치는 펄스형태의 높은 이득과 관련하여 기하학적 배율이 수 백 정도의 반사경계를 사용하여 출력이 크게 낮아짐이 없이 회절한계에 가까운

퍼짐각을 얻을 수 있지만 근거리강도분포(near-field pattern)가 원형고리 형태이며 출력이 공진기 섭동에 민감하다는 단점을 갖는다. 이 논문에서는 낮은 퍼짐각의 발진과 원거리 출력밀도(far-field power density)의 증가를 얻기 위하여, 공진기 내에 선속분할기(beam splitter)를 사용한 양영역 공초점 불안정공진기(positive branch confocal unstable resonator) 구리증기레이저의 발진실험 결과와 레이저출력의 특성측정 결과를 보고한다.

II. 실험

2.1. 레이저장치의 구성

그림 1은 실험에 사용된 구리증기레이저장치의 개략도이다. 실험에 사용된 구리증기레이저는 자체 제작된 공냉식 장치이며 방전관의 내부 직경은 1.2 cm, 탄탈륨 방전전극 사이의 길이는 50 cm이다.^[8] 이 논문에서 보고하는 불안정공진기에 관한 레이저 발진실험은 충전전압 10 kV, 주파수 4 kHz, 네온 원충기체압력 70 mbar의 조건에서 주로 시행되었다.

이 실험에서 사용된 레이저 공진기의 구성과 측정장치가 그림 2에 그려져 있다. 두 개의 레이저 발진파장에서 반사율이 99.5%, 곡률반경이 3 m인 오목거울을 방전관 뒷 쪽 10 cm 되는 위치에 설치하고 방전관 앞 25 cm 지점에 선속분할기(편평도 2λ, 두께 2 mm, 평행도 3 arc min.)를 설치하였다. 이 선속분할기는 코팅이 되지 않은 용융석영판이며 광축과 이루는 각도를 조정하여 출력으로의 투과광과 반사율 99.5%인 볼록거울로 향하는 반사광의 비율을 조절할 수 있다. 예를 들면, 선속분할기를 조정하여 광축의 입사각을 15°에서 70°까지 변화시키면 s-편광된 레이저광의 반사율은 0.07에서 대략 0.28까지 단조증가한다.

2.2. 측정장치

레이저출력은 초점거리가 20 cm인 집광렌즈의 초점 근처에

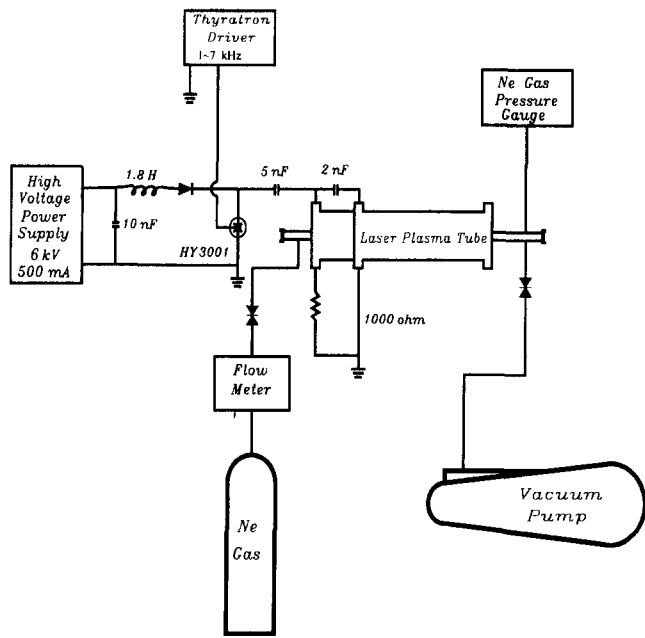


그림 1. 구리증기레이저 장치의 개략도.

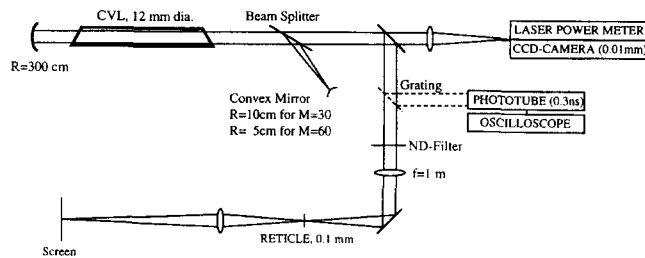


그림 2. 레이저공진기 구성 및 측정장치.

서 열전기더미(thermopile)형의 광측정기(Molelectron, PM5200/PM30)를 사용하여 측정하였다. 이 논문에서 보고되는 레이저 평균출력은 집광렌즈에서의 손실과 퍼짐각 측정을 위해 공진기 외부에 별도로 설치된 광학계에 의한 손실을 보정한 값이다.

퍼짐각 측정을 위해 레이저 출력선속이 10%의 반사율을 갖는 공진기 외부에 설치된 선속분할기와 초점거리가 1 m인 수렴렌즈를 통과하여 0.1 mm 간격의 눈금이 새겨진 십자선(reticle)에 원거리장이 맺히도록 하고, 십자선 눈금의 상과 레이저 선속의 원거리 강도분포(far-field pattern)가 결상렌즈의 상평면에 놓인 스크린 위에 확대되어 나타나게 하여 초점의 직경을 측정하는 방법을 사용하였다. 십자선의 눈금을 집속된 레이저 광으로부터 보호하기 위하여 ND-필터가 사용되었다. 이 방법에 의한 측정오차는 십자선의 최소눈금과 육안 관측과 관련하여 0.05~0.1 mrad 정도의 오차를 갖는다.

레이저출력의 횡적강도분포는 실리콘 검출소자로 구성된 CCD 측정장치(Spiricon Model LBA-100i / Pulnix-TM-7CN, 8.4×9.8 μm, 6.5×4.8 mm)를 이용하여 측정하였다.

III. 공진기 모우드

그림 3과 같이 선속분할기가 없는 기본적인 양영역 공초점

표 1. 공초점 불안정공진기의 규격

공진기의 기하광학적 배율 $M= R_1/R_2 $	M=30	M=60
공진기의 길이 L (cm)	145	147.5
오목거울의 곡률 R_1 (cm)	300	300
볼록거울의 곡률 R_2 (cm)	-10	-5
공진기의 모우드 형성시간 τ_r (ns)	11.3	10.4

불안정공진기에 대하여 오목거울의 곡률반경을 R_1 으로 표시하고 볼록거울의 곡률반경을 R_2 로 표시할 때, 공초점 불안정공진기의 기하광학적 배율은 $M = |R_1/R_2|$ 으로 정의되며, 일주손실(power loss per round trip)은

$$\gamma = 1 - \frac{1}{M^2} \quad (1)$$

와 같이 표현된다.^[9] 이 실험에서와 같이 배율이 큰 경우, γ 는 실질적으로 1에 가까운 값이 되지만, 일반적으로 Cu-Ne 플라즈마는 이득율이 높아 발진과 모우드가 쉽게 형성될 수 있다.

이 실험에서 사용된 두 불안정공진기의 규격을 표 1에 나타내었다. 구리증기레이저와 같은 펄스레이저의 경우, 불안정공진기 레이저선속의 퍼짐각은 공진기모우드가 형성되는 데 걸리는 대략적인 시간인 τ_r 에 의해 결정적인 영향을 받는다. 근축광선을 사용한 해석적인 고찰에 따르면, τ_r 은 대략

$$\tau_r = (2L/c) \frac{\ln[N_o(M-1)] / (\eta M)}{\ln M} \quad (2)$$

으로 주어진다.^[5] 윗 식에서 $N_o (= a_o^2 / \lambda L)$ 는 레이저광속의 외부 반경을 a_o 에 해당하는 프레넬 수이고, η 는 원형고리 모양의 단면을 갖는 레이저광속의 원거리 회절무늬에 의해 결정되는 값으로 0.38에서 0.61사이의 값이 되는데, 이 실험에서 사용한 공진기와 같이 배율 M 의 값이 높은 경우, η 의 값은 0.61이다. 이 실험에서 사용된 불안정공진기의 모우드 형성시간은 표 1에 계산되어 있는 것처럼 레이저 펄스의 대략적인 길이인 40 ns에 비하여 상당히 작으므로, 회절한계에 가까운 퍼짐각을 기대할 수 있다.

그림 3과 같이 원형고리모양의 출력선속을 도출하는 불안정공진기에 대하여 virtual source 이론에 의한 모우드의 고유값의 크기 $|\sigma|$ 에 관하여 VSOURCE 프로그램을 사용하여 계산

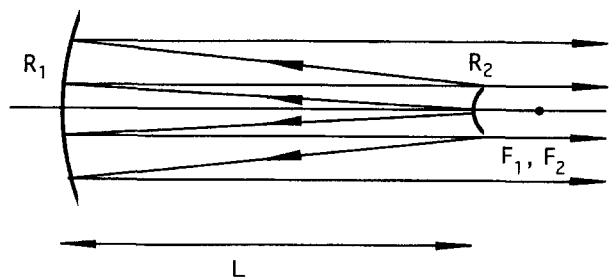


그림 3. 공초점 불안정공진기.

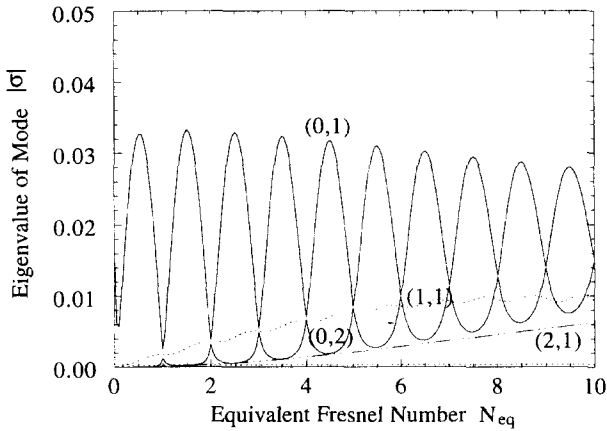


그림 4. 불안정공진기 모우드의 고유값. 배율 $M=60$, $l=0$; 실선, $l=1.2$; 점선.

한 결과가 유효 프레넬 수의 함수로 그림 4에 그려져 있다. 고유값 $|\sigma|$ 와 관련 모우드의 공진기 일주손실과의 관계는

$$\gamma = 1 - |\sigma|^2 \quad (3)$$

로 표현된다. 유효 프레넬 수 N_{eq} 는 불안정공진기의 기하학적 배율 M 과 출력측 거울의 반경 a_2 에 해당하는 프레넬 수 $N_2(=a_2^2/\lambda L)$ 와 다음의 관계를 갖는다.¹⁹⁾

$$N_{eq} = \frac{M^2 - 1}{2g_2 M^2} N_2 \quad (4)$$

이 식에서, 공진기변수 g_2 는 반사경의 곡률반경 R_2 와

$$g_2 = 1 - L/R_2 \quad (5)$$

의 관계에 있다.

그림 4는 배율 $M=60$ 인 공초점 불안정공진기에 대한 계산 결과이며, 배율 $M=30$ 에 해당하는 계산결과도 큰 차이가 없었다. 그림에는 방위(azimuthal) 모우드에 속하고 공진기 일주손실이 가장 적은 두 모우드 (0,1)과 (0,2), 다음 차수의 방위모우드 $l=1$ 과 $l=2$ 에 각각 속하는 두 모우드 (1,1)과 (2,1)의 고유값 곡선이 그림 4에 나타나있다. 다음으로 손실이 적은 모우드 (1,2)의 고유값은 그림에 나타난 프레넬 수의 범위에서 거의 0이다. 발진파장 510.6 nm에 대하여 이 실험에서 사용한 공진기의 N_{eq} 는 0.78임과 공진기 모우드 형성시간 τ 에 대한 논의를 고려할 때 최저 차수의 단일 횡모우드에 가까운 레이저광속을 기대할 수 있다.

IV. 결과 및 고찰

4.1. 레이저 출력특성

이 실험에서 사용한 레이저장치의 동작특성을 파악하고 조리개와 선속분할기를 이용한 공진기에서의 출력특성과 비교하기 위하여 가장 보편적인 평행평판 공진기를 구성하여 레이저의 출력특성을 조사하였다. 이 연구에서 사용한 평행평판 공진기는 반사율이 대략 90%인 금속 코팅된 반사경과 방전관의 진공유지를 겹하고 반사율이 약 8%인 코팅되지 않은 용융석

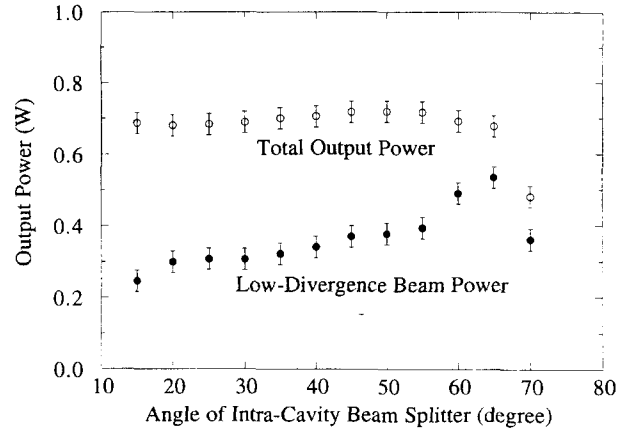


그림 5. 선속분할기의 방향 변화에 따른 레이저 출력의 변화.

영창(편평도; $\lambda/10$)을 사용하여 구성되었다. 반사경 쪽의 또 다른 용융석영창은 광축과 5° 경사를 갖도록 하여 이 창에서 반사된 광속이 레이저발진기 안으로 되먹임되는 것을 방지하였다.

이 실험에서 사용된 평행평판 공진기의 경우, 공진기의 최소반경(레이저 광속의 반경 $a=0.6$ cm, 공진기의 길이 $L=100$ cm, 파장 $\lambda=510.6$ nm 레이저 광에 대하여 $N(=a^2/\lambda L)$ 로 주어지는 프레넬 수는 대략 70이며, 출력은 여러 고차 횡모드를 포함하게 된다. 또한, 출력선속의 퍼짐각은 회절한계값의 수십 배의 값을 가질 것으로 예상할 수 있는데, 실제로 측정된 퍼짐각은 2 mrad이었으며 회절한계값($\theta_d=1.22 \lambda/D$, 직경 $D=2a$)인 0.05 mrad의 40배가 된다.

배율 $M=60$ 인 공초점 불안정공진기를 설치한 후 측정된 선속분할기의 각도 변화에 따른 레이저장치에서 도출되는 총출력과 ASE선속의 출력을 제외한 낮은 퍼짐각을 갖는 레이저 선속만의 출력이 그림 5에 나타내었다. 그림 5에서 선속분할기의 각도가 커짐에 따라 출력이 증가하는 것은 씨선속(seed beam)의 세기가 증가하기 때문이지만 60°를 넘는 과도한 각도에서는 선속분할기 투과율의 저하로 인하여 출력이 차츰 감소하여 70°에서는 총출력은 물론이고 레이저출력도 급격하게 감소한다. 레이저광속의 퍼짐각에 대한 측정결과가 그림 6에 나타나있다. 레이저선속이 선속분할기에 입사하는 각도가 커짐에 따라 선속의 퍼짐각이 증가하는 경향은 씨선속의 세기 증가에 따른 고차모우드의 발진에 기인한다.

배율 $M=60$ 인 불안정공진기로부터 도출된 레이저광의 근거리강도분포에 대한 CCD 사진이 그림 7에 나타나 있다. 이

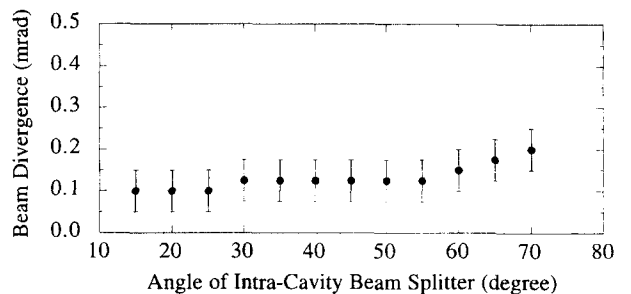


그림 6. 선속분할기의 방향 변화에 따른 레이저선속의 퍼짐각 변화.

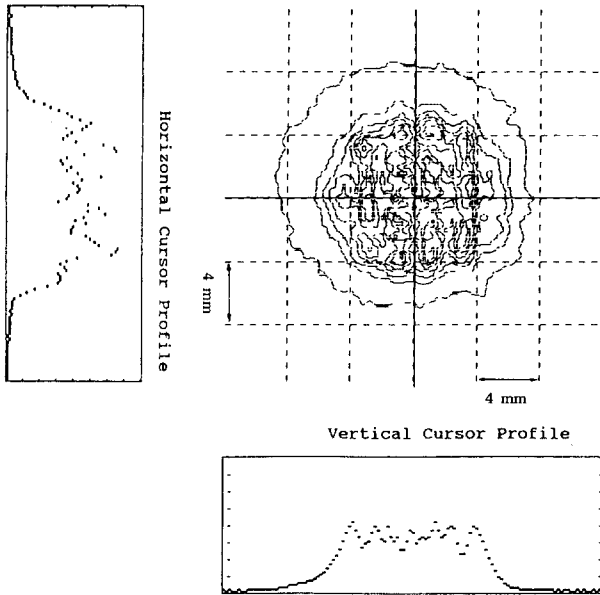


그림 7. 선속분할기에서 60 cm 떨어진 곳에서 측정된 레이저선속의 근거리 강도분포.

강도분포는 발진기에서 60 cm 떨어진 곳에서 측정되었다. 전체적인 근거리분포는 그림 3과 같이 선속분할기가 없는 불안정공진기의 원형고리형 분포가 아니고 정밀가공용 레이저출력으로 요구되는 flat-top 형태에 보다 가까운 형태를 보여준다. 근거리장은 2 mm 두께의 선속분할기 두 면에서의 반사 때문에 수직방향으로 뚜렷한 간섭무늬가 관찰되었으며, CCD 측정장치 검출소자의 유한한 크기로 인하여 등고선 형태의 측정결과가 복잡한 형태로 나타나있다. 이 실험에서 선속분할기를 사용한 용융석영 평행평판을 한 면이 무반사 코팅된 50% 선속분할기로 교체했을 때 낮은 투과율로 인해 출력은 낮았으나 간섭무늬가 없어진 균일한 강도분포를 관측할 수 있었다.

출력선속의 편광도를 측정하기 위해서는 편광분할기를 사용하였다. 이 편광분할기는 감쇄비 500 : 1, 투과율 $T_p > 90\%$, 그리고 99.5% 이상의 반사율을 갖는다. $M=60$ 인 경우, ASE 출력을 포함한 총출력의 편광도는 2.5 : 1이고 낮은 퍼짐각을 갖는 레이저출력의 편광도는 30 : 1 이하였으며, $M=30$ 인 경우는 15 : 1의 편광도를 보여주었다.

배율 $M=30$ 인 불안정공진기에서 선속분할기의 방향을 조정하여 레이저발진기에서 도출되는 레이저광속의 입사각이 브루스터각인 55.6° 가 되도록 하고, 블록거울의 위치를 변경하여

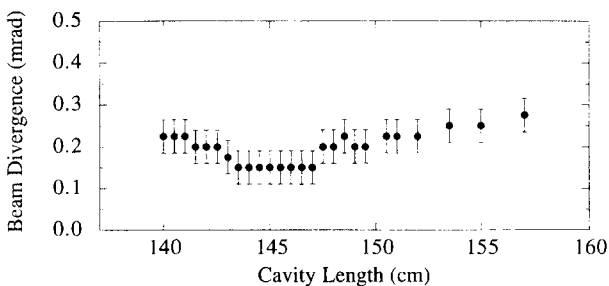


그림 8. 블록거울($M=30$)의 위치에 따른 출력의 퍼짐각 변화.

공진기의 길이를 변화시켜 주었을 때 레이저선속의 퍼짐각 측정을 한 결과가 그림 8에 나타나있다. 퍼짐각은 공초점 공진기의 조건을 만족하는 값 145 cm 근처에서 최소값 0.15 mrad이 되며, 공진기 길이의 변화 ± 1.5 cm내에서 최소값을 유지함을 볼 수 있다.

4.2. 출력펄스

그림 9는 오실로스코프(HP 54522A, 500 MHz)를 사용하여 측정된 방전펄스와 레이저펄스의 모양을 보여준다. 방전전압 펄스는 방전음극에 설치된 고전압 탐침자(high voltage probe, Tektronix P6015A, 75MHz)를 사용하여 측정하였으며, 방전전류펄스는 피크축전기(peak capacitor)의 접지부에 설치한 자체 제작된 MPL(magnetic pickup coil)을 이용하여 검출하고 오실로스코프의 적분기능을 이용하여 측정하였다. 레이저펄스는 회절격자를 사용하여 두 발진파장을 분해하고, 상승시간(rise time)이 0.27 ns 정도인 광계측관(phototube, Hamamatsu R1193U-01)을 사용하여 검출하였다. 레이저 작동조건은 충전전압 10 kV, 펄스반복률 4 kHz, 네온기체압력 75 mbar이며, 방전전압의 최대값은 6.5 kV이고, 방전전압과 방전전류의 상승시간은 대략 55 ns이다. 이 실험에서 사용한 MPL의 출력신호를 보정하기 위하여 펄스발생기로부터 얻은 100 ns 펄스폭을 갖는 2 V 구형파를 사용하여 40 mA의 전류신호를 얻어서 MPL로 측정된 전류펄스와 비교하였다. 이 측정값을 이용하여 그림 9에 보이는 방전전류의 값을 보정하여 전류의 최대값으로 0.85A를 얻었다.

그림 9에 나타난 배율 $M=60$ 인 불안정공진기에서 측정된 510.6 nm 레이저펄스의 모양은 다른 공진기에서 측정된 펄스의 모양과는 달리, 5개의 분명하게 구분되는 펄스들의 구조를 갖고 있다. 이 짧은 펄스들의 간격은 9.1 ± 0.6 ns로서 공진기의 길이에 해당하는 공진기 일주시간 10 ns와 비슷한 값을 갖는다. 또, 순간출력이 가장 큰 펄스의 길이(FWHM)는 약 2 ns 이다. 578.2 nm 레이저펄스의 모양을 보다 확대하여 보았을 때, 출력의 최대값 부근에 역시 4.9 ± 0.2 ns의 간격을 갖는 3개의 작은 펄스들을 볼 수 있었다. 그림 9의 펄스간격이 대단히 규칙적이고 공진기 일주시간 또는 그 약수와 비슷하다

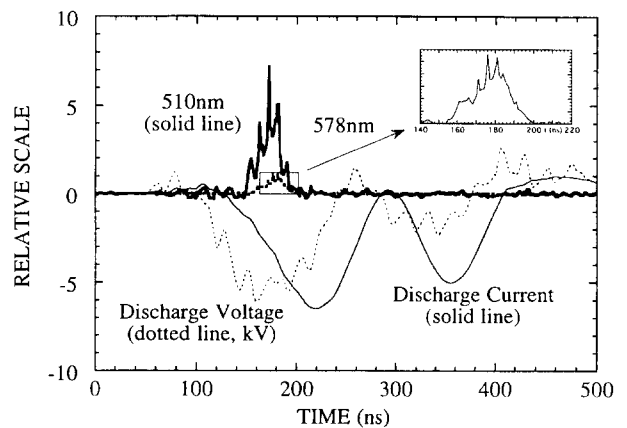


그림 9. 자체감현상을 보이는 레이저 출력펄스의 모양.

는 사실과 단일 횡모우드 발진이 가능하다는 모우드해석 결과로부터 이 실험에서 관측된 자발적인 펄스 형태의 발진은 자체잠김현상에 의한 것으로 판단된다. 다만, 짧은 펄스형태의 레이저발진으로 인하여 그림 9에 나타난 자체잠김펄스는 불완전한 형태를 보여준다. 그림 9에 나타난 두 파장의 레이저 510.6 nm : 578.2 nm의 출력비는 6.5 : 1로서 평행평판 공진기의 1.5 : 1과는 상당한 차이를 보여주었다. 불안정공진기에서 발진되는 두 파장의 출력비가 크다는 사실은 공진기 손실의 증가에 기인하며 레이저발진이 발진문턱에서 이루어지고 있다는 사실을 의미한다. 이러한 관측은 레이저펄스의 모양에 자체잠김현상이 관측되는 사실과 부합되고 있다.

V. 결 론

공진기 내에 선속분할기를 갖는 양영역 반공초점 불안정공진기를 갖는 구리증기레이저를 구성하고 레이저 출력선속의 퍼짐각을 개선하기 위한 발진 실험하였다. 최소 퍼짐각은 곡률반경 10 cm인 볼록거울(M=30)을 사용한 경우 0.2 mrad 이며, 곡률반경 5 cm인 볼록거울(M=60)을 사용하였을 때는 0.1 mrad의 값이 측정되었다. 퍼짐각의 감소에 의해, 평행평판 공진기의 퍼짐각 2 mrad과 비교하였을 때, 불안정공진기의 원거리 출력밀도의 증가는 대략 130배 개선된 결과를 보여주었다.

이 실험에는 선속분할기의 사용으로 공진기의 손실에 의해 놓여진 각도에 따라 20~50% 출력이 감소되었으나, 종래의 불안정공진기 구리증기레이저 장치에서 관찰되는 고리모양의 근거리장 형태가 개선되어 flat-top 형태를 얻을 수 있었다. 선속분할기를 브루스터각인 55.5°로 설치하였을 때, 0.94 이상의 편광도로 선형편광된 낮은 퍼짐각의 레이저발진을 얻을 수 있었다. 규칙적이고 짧은 펄스들로 구성된 출력펄스는 자체잠김

현상이 일어나고 있음을 보여주었으며, 보다 부드러운 펄스 형태에 비하여 높은 순간출력을 가지므로 제2고조파 발생이나 광펌핑에 활용할 수 있을 것으로 예측된다.

감사의 글

이 연구는 한국과학재단 지정 지역협력 연구센터인 조선대학교 수송기계부품 공장자동화 연구센터의 연구비 지원을 받았음을 알립니다.

참고문헌

- [1] S. G. Bartoshevich, V. D. Burlakov, V. V. Zuev, N. P. Nazarenko, A. N. Mat'sev, and G. A. Skripko, *Applied Optics* **31**, 7575 (1992).
- [2] H. W. Bergmann, *ICALEO'95 Laser Materials Processing Proceedings*, pp. 421-430 (1995).
- [3] 박영준, 백영준, *요업학회지* **35**, 41 (1998).
- [4] K. I. Zemskov, A. A. Isaev, M. A. Kazaryan, G. G. Petrash, and S. G. Rautian, *Sov. J. Quantum Electron.* **4**, 474 (1974); A. A. Isaev, M. A. Kazaryan, G. G. Petrash, S. G. Rautian, and A. M. Shalagin, *Sov. J. Quantum Electron.* **7**, 746 (1977).
- [5] R. S. Hargrove, R. E. Grove, and T. Kan, *IEEE Quantum Electron.* **QE-15**, 1228 (1979).
- [6] R. R. Lewis, G. A. Nayler, N. Salkeld, A. J. Kearsley, C. E. Webb, *Proc. SPIE* **737**, 10 (1987).
- [7] N. A. Ryabin, *Sov. J. Quantum Electron.* **19**, 426 (1989).
- [8] 이재경, 임기건, *한국광학회지* **4**, 476 (1993); 정지철, 유영태, 임기건, *한국광학회지* **8**, 297 (1997).
- [9] A. E. Siegman, *Lasers* (Oxford University Press, 1986).

Output characteristics of a confocal unstable resonator copper vapor laser

Ji Cheol Jeung and Young Tae Ryu

Department of Mechanical Engineering, Chosun University, Kwangju, 501-759, Korea

Jae Soon Youn, Se Jong Baik and Kiegon Im

Department of Physics, Chonnam National University, Kwangju, 500-757, Korea

(Received December 7, 1998, Revised manuscript received May 6, 1999)

The positive branch confocal unstable resonator equipped with an intra-cavity beam splitter has been studied experimentally to achieve low beam divergence in the copper vapor laser. Output laser beams of 0.15 mrad divergence was achieved from the laser system with a 10 cm curvature convex mirror ($M = 30$), and laser beams of 0.1 mrad was achieved for a 5 cm curvature convex mirror ($M = 60$). The power density of the far-field beam from the $M=60$ resonator laser was 130 times higher than the case of the 2 mrad-operation with the plane-parallel resonator. We also observed the self-mode-locking from the unstable resonator laser pulses.