

400 MHz tunability를 갖는 cw 단일 발진선 BeO 도파관 이산화탄소 레이저의 제작과 특성조사 *

Fabrication and Output Characteristics of the 400 MHz tunable cw BeO waveguide CO₂ laser

조재홍, 강선모

한국표준연구소 레이저연구실

채 경, 장 수

한남대학교 물리학과

G. Kramer

독일 연방 공화국, 연방물리기술청, Lab. 4. 42

내경이 2 mm, 외경이 20 mm이고, 길이가 200 mm인 BeO 세라믹관을 이용하여 단일 발진선을 갖는 연속발진 BeO 도파관 CO₂ 레이저를 제작하였다. 이때 레이저의 총길이는 약 420 mm이며, 공진기 길이는 365 mm 이다. 가스압력비가 He : N₂ : CO₂ = 5 : 2 : 3 이고, 가스 입력부의 총압력이 91 torr 근처에서 이 레이저의 단일 발진선인 10P(14) line의 출력이 800 mW 이상이였으며, 횡모드는 대단히 안정된 EH₁₁ (TEM₀₀에 대응) 단일모드였다. 또한 위의 조건에서 이 레이저의 tunability는 367 MHz 였다.

1. 서론

T.J.Bridges 등이 도파관으로 유리도세관을 사용하여 10.6 μm의 CO₂ 레이저 발진에 성공한 이래⁽¹⁾ 적외선 영역의 분자분광학에서 광대역 주파수 튜닝(tuning)이 가능한 도파관 CO₂ 레이저는 많은 관심을 끌었다. 특히 기존의 유리 대신 열전도도(thermal

conductivity)가 뛰어나고⁽²⁾ 10.6 μm에서 도파관 손실⁽³⁾이 극도로 작은 BeO가 보다는 도파관 CO₂ 레이저 재료로 부각되었다. 이들 도파관 CO₂ 레이저는 기존의 레이저에 비하여 다음과같은 장점을 가지고 있다. 즉, 레이저의 크기를 작게할수 있으며, 보다 높은 레이저 이득율을 갖고 있고, 높은 압력에서 레이저 발진이 가능하므로 광대역 주파수 동조가 되는 레이저를

* 본 연구는 과학 기술처 특정 연구 개발 사업의 지원과 한국 표준 연구소 연·학 협동 연구의 지원, 그리고 과학 재단 해외 연수지원금으로 수행되었음.

만들수 있다. 또한 발진모드가 도파관의 기하학적 구조에 의하여 결정되므로 대단히 안정된 단일 횡모드의 광속을 얻을수 있고, 레이저 모드 선택과 레이저 여기 영역간에 효과적인 배합을 할 수 있다는 것이다.(4)

이러한 장점들을 갖는 도파관 레이저의 매질로 BeO를 선택하여 최고 1 GHz 까지 주파수 튜닝이 되는 레이저를 E.G.Burkhardt등(2), R.L.Abrams(5) E.N.Bazarov등(6)등이 연구하였으며, 이를 이용한 OsO₄ 분자의 포화 분광연구도 E.N.Bazarov등(7)에 의하여 이루어졌다. 이와같이 광대역 tunability 를 갖는 BeO 도파관 레이저는 적외선 영역에서 분자 분광학을 연구하는데 중요한 도구가 되고있다.

이 논문에서는 OsO₄ 분자 분광(8)에 이용할 BeO 도파관 레이저를 제작하여 그 특성을 조사하였다. 즉 도파관 손실을 고려하여 도파관 손실이 가장 적은 구조로 BeO 세라믹관 (내경 : 2 mm, 외경 : 20 mm, 길이 : 200 mm)과 회절격자를 사용하여 단일 발진선을 갖는 연속 발진 도파관 CO₂ 레이저를 제작하였으며, 시간에 따른 출력변화 및 PZT에 전압에 따른 출력 곡선을 조사하였다.

2. tunable 도파관 CO₂ 레이저의 설계 및 제작

400 MHz 의 tunability를 갖기 위해서는

$$|\nu_c - \nu_0| \geq 200 \text{ MHz} \quad (1)$$

를 만족하여야하고 보유하고있는 BeO도파관의 길이가 200mm이므로 레이저 공진기 길이는

$$L > 200 \text{ mm} \quad (2)$$

가 되어야한다. 여기에서 ν_c 는 최대 튜닝이 가능한 주파수이고, ν_0 는 이득곡선이 최대가 되는 주파수이다. (1)식에서 먼저 만족해야 할 조건이 횡모드 상의

간격인

$$c/2L \geq 400 \text{ MHz} \quad (3)$$

인 것으로 단일 모드의 조건이다. 그러므로 식(1)과 식(2)에서

$$200 \text{ mm} < L \leq 375 \text{ mm} \quad (4)$$

가 된다. 총 공진기 길이에서 방전관 길이 즉 BeO 도파관 길이를 뺀 길이는 (4)식에서 175 mm 이며, 단일 발진선으로 발진하기 위하여 출력경으로 사용할 예정인 회절격자의 플라즈마에 의한 손상 방지와 고전압의 절연을 위하여 한쪽 도파관 입구는 ZnSe Brewster 창으로 밀봉하며, 이 경우 도파관 입구와 회절격자 사이가 멀어지는 관계로 J.J.Degnan 등이 발표한 공진기 구조와 결합손실에 대한 논문의 표3의 10.6 μm , case III, Bore직경 2.00 mm 인 경우에 해당하는 설계 조건을 적용하였다.(9) 즉, 곡률반경 24.50cm의 거울을 도파관 입구에서 12.25 cm 떨어진 곳에 설치해야 하고 그 거울의 반경은 2.6 mm 가 가장 좋다. 본 설계에서는 회절격자를 설치해야 되기때문에 이 거울을 ZnSe 렌즈로 대체 하고자 하며 기존 상용의 ZnSe렌즈를 사용해야 하는 관계로 공진기 결합 손실이 1.3 * 보다 크게될 촛점거리 254 mm, 반경 12.7 mm 인 ZnSe 렌즈를 거리 127mm에 고정시켜서 사용하였다. 한편, 이러한 거리 즉, 도파관 한쪽의 공진기 반사경 (여기서는 렌즈) 까지의 거리가 127 mm 인 경우 (4)식을 고려하면 여분의 길이는 48 mm 여유밖에 없고 이 공간내에서 손실을 가장 적게할 수 있는 방법은 역시 참고문헌 (9)의 표(3)의 10.6 μm , case I, Bore 직경 2.00 mm 인 경우로 Bore 직경 2.00 mm 에서 평면 거울을 도파관 입구에서 9.9 mm 이하로 설치하는 것이다. 본 설계에서는 반사도 99.5 %인 직경 19.1 mm

실리콘 거울을 도파관 입구에서 8 mm 떨어진 곳에 설치하였다.

이렇게 설계하여 제작된 레이저의 개략도는 그림 1 과 같고, 그 완성된 레이저의 사진은 그림 2와 같다.

으로 된 전기양극이 설치되어있고, 중앙에 가스 배출 구이자 전기음극인 구리관이 설치되어있다. 가스 플라즈마에 의한 광학부품의 손상을 적게하기 위하여 가스는 도파관 중앙에서 배출되게 하였으며, 전기 음극

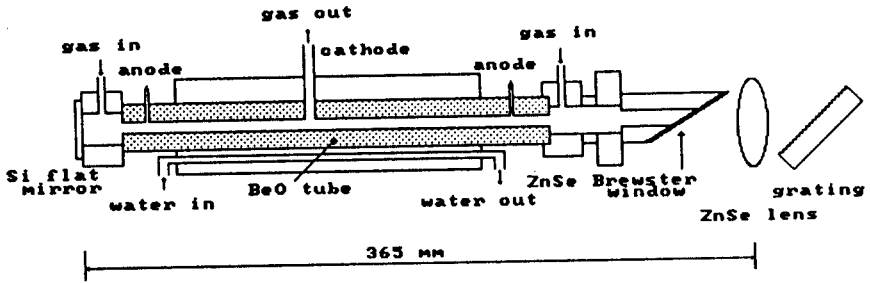


그림 1. 400 MHz 튜닝이 가능하도록 설계된 cw 단일

발진선 BeO 도파관 이산화탄소 레이저의 개략도

(레이저 길이: 420 mm, 공진기 길이: 365 mm).

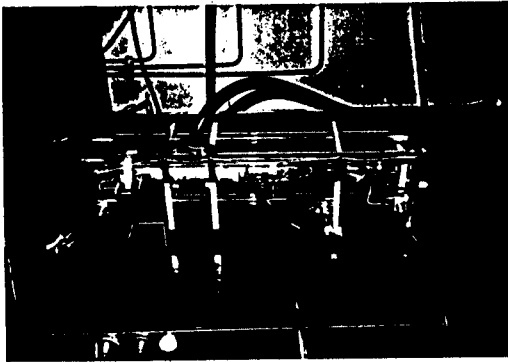


그림 2. 제작된 BeO 도파관 이산화탄소 레이저의 실험 사진

이미 언급 하였듯이 내경 2 mm, 외경 20 mm 그리고 길이가 200 mm 인 BeO 볼 도파관 매질로 사용하였으며, 레이저의 효율이 좋아지는 수냉식 냉각 방법을 사용 하기 위하여 이를 알루미늄 냉각관이 감싸고있다. (2) 이 BeO 도파관의 양쪽 끝에서 1.5 cm되는 곳에 텅스텐

을 가능한한 도파관 양쪽의 광학 부품들로부터 먼곳에 설치하였다. 출력경으로는 초점거리 25.40 cm 이고 직경 2.54 cm 인 ZnSe 렌즈와 25 mm × 25 mm × 10 mm 구리판 위에 150 lp/mm 의 격자 크기를 갖는 회절격자의 조합으로 단일 발진선 발진 및 발진선을 임의로 선택할 수 있게하였다. 또한 이 회절격자를 0.81 μm/V 인 PZT (Piezoelectric Transducer) 에 설치하여 10 P(14) 등의 단일 발진선에서 최대 400 MHz 까지 주파수 튜닝이 되도록 하기 위하여 Lansing stabilizer (Lansing Research Co., 80.215) 를 사용하여 이 PZT에 전압을 1.6 kV까지 인가하였다. 그리고 열팽창에 의한 공진기의 길이변화를 억제하기 위하여 열팽창이 적은 석영유리 (quartz glass) 관 3개로 공진기를 고정시켰다. 전원으로는 10 mA - 20 kV의 고전압 전원장치를 자체제작하여 사용하였으며, 800 kΩ - 80 W의 Ballast 저항을 통하여 레이저의 두 양극

에 연결하였다.

3. 실험결과 및 논의

그림 3. BeO 도파관 이산화탄소 레이저 출력인 EH₁₁ 링 모드의 burn pattern (레이저 출력경인 회절격자로부터 10 cm 되는 지점에서 측정).

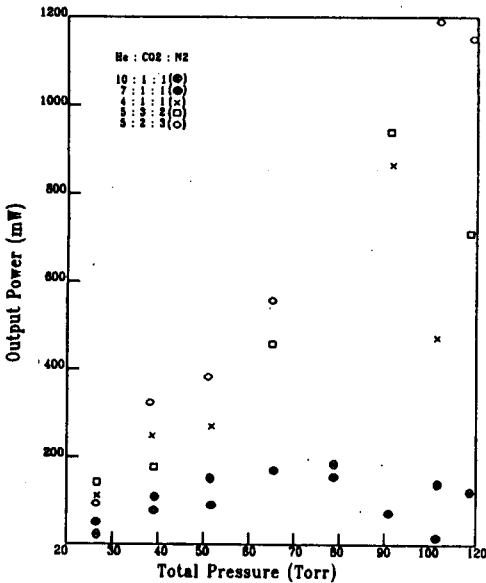


그림 4. 여러가지 가스 혼합비들에서 가스입력부의 총 압력에 대한 출력 (발진파장 $\lambda = 10.53 \mu\text{m}$, 인가 전압 = 5 kV 이상, 인가 전류 = 4 mA 이상).

제작된 BeO 도파관 레이저 출력의 Burn pattern이 그림 3 에 나와 있으며, 이 burn pattern는 레이저 회절격자로부터 10 cm 떨어진 지점에서 측정한 것으로 TEM₀₀ 모드에 대응하는 도파관 EH₁₁ 링 모드임을 보여준다. 이것은 이미 발표된 결과들과 잘 일치하고 있으며

(11), EH₁₁ 링모드가 발전되도록 제작된 레이저가 설계 대로 잘 작동됨을 알 수 있다. 그림4는 He, N₂, CO₂ 가스들의 여러가지 혼합 비율들에 대해서 총 압력에 대한 출력을 나타낸것이다. 여기에서 총 압력은 레이저 도파관의 가스 입력부에서의 압력으로 실제 도파관 내부의 압력은 이보다 훨씬 작다. 실제로 가스입력쪽이 91 torr 일때 가스 출구쪽에서는 27 torr였다. He : N₂ : CO₂ 가 5 : 3 : 2 또는 5 : 2 : 3 일때가 다른 혼합비율보다 출력이 6 - 10배 정도 크게 나왔다. 그리고 이러한 혼합비율에서 총압력이 증가하면 출력도 증가하고 가스 입력부의 압력이 70 mbar 근처에서 최대 출력을 나타내고 있으며 He : N₂ : CO₂ = 5 : 2 : 3 혹은 5 : 2 : 3 일때 최고 1 W 정도의 출력이 나왔다. 이 경우 10 P(14)의 단일 발진선에서 실험한 것으로 다른 발진선들에 대한 출력은 추후 연구할 예정이다. 그리고 all-line 에서 발진하는 경우 통상 이러한 단일 발진선 출력의 10배 정도의 출력이 나오므로 이 레이저에서는 대략 10 W 의 출력이 예상된다. 참고문헌 (11)를 참고하면 all-line 공냉식 BeO 도파관 레이저의 경우 2 - 2.5 W 이므로 수냉식의 냉각 방법이 훨씬 효율이 좋을음을 알수있다.

그림 5은 PZT에 인가된 전압에 대한 출력 곡선으로 제작된 레이저의 이득 곡선을 나타낸다. 이 경우 He : N₂ : CO₂ = 5 : 2 : 3 이고, 가스 입력부쪽의 총압력은 91 torr, 전압은 6.6 kV, 전류는 8 mA 이다. 이때 최대 출력은 860 mW 였다. 그리고 곡지점과 곡지점 사이가 레이저의 종모드 간격이므로 $c/2L = 410 \text{ MHz}$ ($L = 365 \text{ mm}$)이므로 (4)식에서 언급하는 $|\nu_c - \nu_i|$ 의 2배인 총 tunability는 367 MHz이다.

그림 6은 이렇게 제작된 레이저의 출력의 시간적 변화를 나타낸 것으로 실험 조건은 그림 5과 동일하다.

총 2분정도의 시간에 4 *정도의 출력 변화가 있었다.

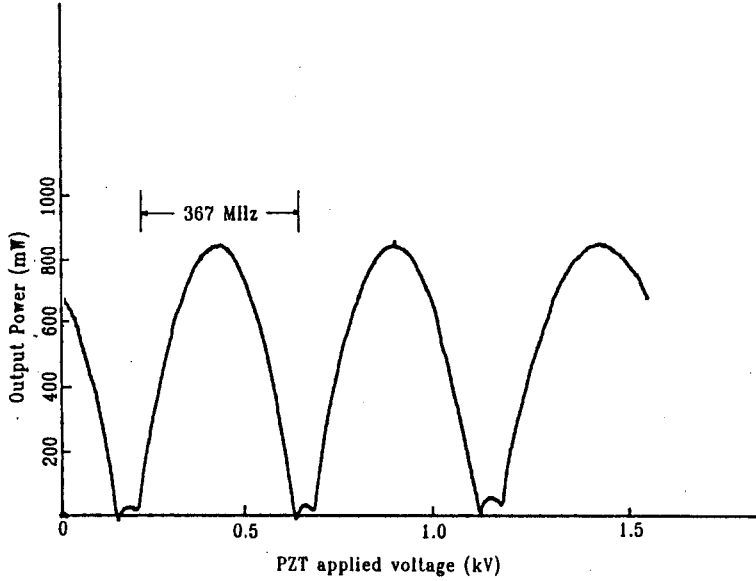


그림 5. PZT에 인가된 전압에 대한 출력곡선의 변화 (가스 혼합비 He: N₂ : CO₂= 5 : 2 : 3,

가스 입력부의 총압력:91 torr, 인가전압:6.5 kV, 인가전류:8 mA, 발진파장 $\lambda = 10.53\mu\text{m}$).

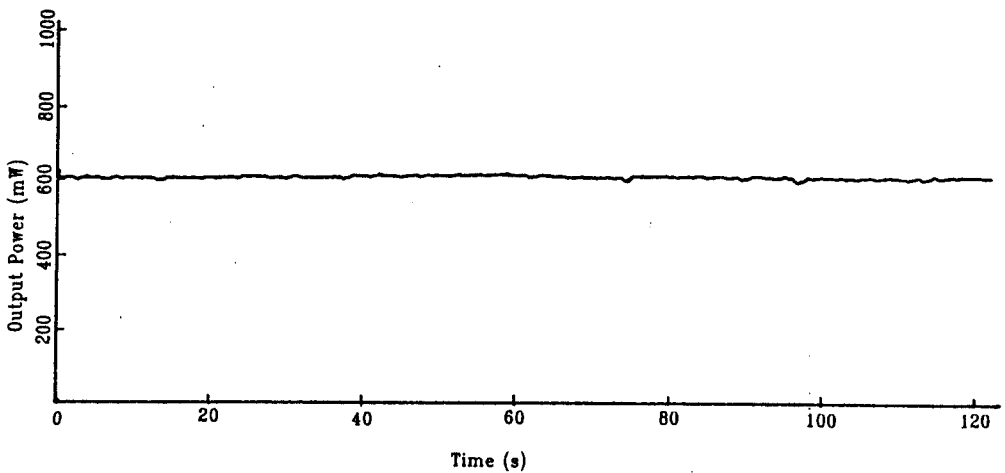


그림 6. 제작된 BeO 도파관 CO₂ 레이저의 시간에 따른 출력 변화 (제반조건은 그림 5 와 동일).

4. 결 론

J. J. Degnan의 도파관 결합 손실에 대한 이론⁽¹⁰⁾과 J. J. Degnan의 tunability계산 이론⁽⁹⁾을 바탕으로 400 MHz를 갖는 cw단일 발진선 BeO도파관 CO₂ 레이저를 설계하고 제작하였다. 도파관 재질은 열적 특성이 우수한 BeO를 선택 하였고, 선 편광된 10 P(14)line의 단일 발진선이 발진되게 설계하였으며, PZT를 사용하여 400 MHz정도의 주파수 튜닝이 가능하게 하였다. 또한 효율을 높이기 위하여 수냉식 방법을 선택하였으며, 이때 레이저의 총 길이는 약 420 mm이며 공진기 길이가 365 mm이다.

제작된 레이저의 횡모드는 EH₁₁모드로 원형이었고 출력은 4 mW 내에서 안정되어 있었으며 가스 압력비가 He : N₂ : CO₂ = 5 : 2 : 3 혹은 5 : 3 : 2인 경우가 다른 경우보다 출력이 월등히 높았다. 그리고 이 레이저의 tunability는 367 MHz로 측정 되었으며 앞으로 공진기 길이가 짧은 새로운 레이저를 제작하여 이 값을 400 MHz이상으로 늘릴 예정이다.

참고 문헌

1. T. J. Bridges, E. G. Burkhardt and P. W. Smith, Appl. Phys. Lett., **20**, 403 (1972)
2. E. G. Burkhardt, T. J. Bridges, and P. W. Smith, Opt. Commun., **8**, 193 (1972)
3. R. L. Abrams, W. B. Bridges, IEEE J. Quant. Electron., **QE-9**, 940 (1973)
4. 이 민희, 새물리, **23**, 148 (1983)
5. R. L. Abrams, Appl. Phys. Lett., **25**, 304 (1974)
6. E. N. Bazarov, G. A. Gerasimov, and A. I. Sazonov, Sov. J. Quant. Electron., **8**, 345 (1979)
7. E. N. Bazarov, G. A. Gerasimov, V. P. Gubin, A. I. Sazonov, N. I. Starostin, and V. V. Fomin, Sov. J. Quant. Electron., **10**, 1550 (1980)

8. 조 재홍, "OsO₄ Ramsey Clock을 이용한 광 주파수 측정", (박사후 연수 보고서) 한국 표준연구소, 1990. 5
9. John J. Degnan, J. Appl. Phys., **45**, 257 (1974)
10. J. J. Degnan and D. R. Hall, IEEE J. Quant. Electron., **QE-9**, 901, (1973)
11. 김 창우, 김 재기, 새물리, **29**, 448 (1989)