

고주파 여기식 슬랩 도파관 CO₂ 레이저 제작 및 평가

김규식^{*} · 최중운^{**} · 우삼용^{***} · 이영우^{*}

^{*}목원대학교 · ^{**}호남대학교 · ^{***}한국표준과학연구원

The development and evaluation of the RF excited slab-waveguide CO₂ laser

Kyu-Sik Kim^{*} · Jong-Woon Choi^{**} · Sam-Young Woo^{***} · Young-Woo Lee^{*}

^{*}Mokwon University · ^{**}Honam university · ^{***}KRISS

E-mail : woon@honam.ac.kr

요 약

고주파 여기 방식의 슬랩 도파관 CO₂ 레이저를 제작하고 성능을 평가하였다. 실험에 사용된 공진기의 구조는 concave mirror 두 개로 이루어진 negative branch와 concave와 convex mirror로 이루어진 positive branch로서 불안정 공진기의 구조를 이루고 있다. 도파관의 크기는 40×2×400mm이며, 123MHz의 입력 주파수를 사용하였다. 혼합가스의 비율은 CO₂:N₂:He=1:1:3이다. 압력은 10에서 60 torr, RF 입력 파워는 100에서 900W까지 증가시키면서 출력을 측정하였다. 실험 결과 압력이 40 torr, RF 입력파워가 900W일 경우, negative 공진기와 positive branch의 최대파워는 각각 50.7 W와 71.8 W, 효율은 6.5 %와 9.2%이다.

ABSTRACT

We have developed the RF discharge Excited slab Waveguide CO₂ laser and measured the output power. We make used of concave and concave mirror, concave and convex mirror that negative branch and positive branch unstable resonator, respectively. The resonator active dimension is 2×40×400 mm and ratio frequency is 123 MHz. The gas mixing ratio is CO₂:N₂:He=1:1:3. The pressure in resonator is from 10 to 60 torr and RF input power increased from 100 to 900 W. so that We obtained laser maximum output power of negative branch and positive branch resonator 50.9 W and 70.8 W and efficiency is 6.5 % and 9.2 %, respectively

키워드

slab, waveguide, RF excited, CO₂

1. 서 론

슬랩 도파관(slab waveguide) CO₂ 레이저에 관한 이론은 1972년 Bridges 등에 의하여 최초로 제안되었으며, 1978년 Lachambre 등에 의해 고주파 여기 방식의 CO₂ 레이저를 발전시켜 연속 발진 CO₂ 레이저를 처음으로 개발하였다.[1] 그 후 여러 나라에서 슬랩 도파관 CO₂ 레이저에 대한 연구를 하고 있다.[2-7] 일반적인 슬랩 도파관 CO₂ 레이저를 DC 여기 방식의 CO₂ 레이저와 비교 설명하면, DC 여기 방식의 경우 낮은 압력에서 고 전압을 이용하여 방전하며, 고 출력을 얻기 위해서는 전원공급기의 크기가 커지고, 가스 순환 장치가 필요함으로 장치가 매우 복잡하다. 하지만 RF 여기 방식의 밀봉형 슬랩 레이저는 가스 순환장치가 불필요하여 시스템의 구성을 간단히 할 수 있고, 고전압 여기 방식이 아닌 고주파

여기 방식을 사용함으로써 전원 공급기의 크기도 줄일 수 있다. 고주파 방전으로 전극이 직접 방전에 드러나지 않기 때문에 전극의 스퍼터링 현상이 없고, 가스의 열화 및 광학부품의 손상이 적다. 단위 체적 당 방전 입력을 높게 할 수 있으며, 매질의 단위 부피당 여기 에너지가 증가되어 보다 쉬운 레이저 발진이 가능하다. DC 여기 방식에 비해 10배에서 100배 정도 빠르게 혼합가스를 이온화시킬 수 있으므로 레이저의 수명을 오랫동안 유지 할 수 있다. 따라서 RF 여기 방식의 레이저는 밀폐형으로 동작시킬 수 있다. 현재 슬랩 CO₂ 레이저는 Rofin-Sinar사에서 수 kW급 슬랩 레이저가 상품화 되고 있으며, 공진기 형태가 하나가 아닌 매트릭스 형태의 슬랩 레이저로 출력을 더욱 증가시키고 있다.[8]

본 연구에서는 기존 방식보다 크기가 작으면서 더 높은 출력을 얻을 수 있는 RF 여기 슬랩 도파관 레이저를 제작하여 그 출력 특성을 실험하였다.

II. 공진기 제작

그림 1은 본 실험에서 제작한 슬랩 도파관 CO₂ 레이저이다. 위쪽 알루미늄 전극에 RF 전압이 인가되며, RF 인가 시 전극에 발생하는 열을 냉각시켜주기 위하여 전극 모두 냉각수 연결하는 확산 냉각법을 이용하였다. RF 전압 인가 시 도파관에 균일한 전압 분포가 발생하여 전극사이에서 균일한 플라즈마가 발생하도록, [9] 전극의 양쪽 옆면에 13개씩 총 26개의 코일을 연결하였다. 도파관의 양쪽 끝에 설치한 concave와 convex 미러는 챔버 내의 온도에 따라 미러의 위치가 변하지 않도록 하기 위해 직경 20 mm의 수정봉 위에 설치하였다.

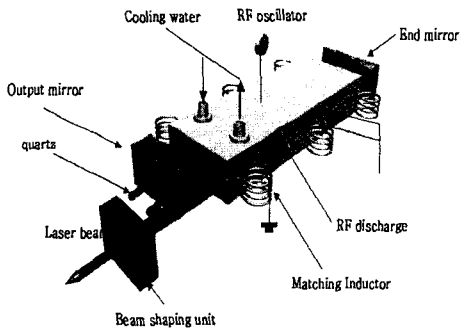


그림 1. 슬랩 도파관 CO₂ 레이저의 공진기

1. 도파관 전극과 미러

그림 2는 알루미늄으로 만들어진 전극의 구조이다. RF 슬랩 레이저에서 전극 사이의 간격은 1.5~3.5 mm로 설계를 한다.[10-11] 본 실험에서는 알루미늄을 넣어 간격을 2 mm로 만들었다. RF 전압 인가 시 플라즈마가 발생하는 영역은 40×2×400mm이다. X축 방향의 프리넬 수와 Y축 방향의 프리넬 수는 다음 식과 같이 나타낸다. 여기서 N_x가 N_y보다 크기 때문에 안정형 공진기로 만들면 회절손실이 발생하므로 불안정 공진기로 제작하였다.

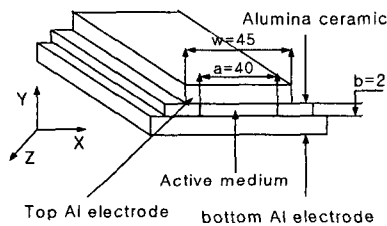


그림 2. 전극의 크기

$$N_x = \left(\frac{b^2}{L\lambda} \right) \gg N_y = \left(\frac{a^2}{L\lambda} \right) \quad (1)$$

미러는 구리에 금을 코팅하였고, 출력 미러와 전반사 미러의 반지름은 negative 형의 경우 380 mm와 420 mm, positive 형의 경우 4210 mm와 5000 mm이다. 이때 output coupling T는 8.6%와 16%이고, output coupling 손실은 0.086과 0.16, geometrical magnification M은 1.094와 1.19이며, beam quality M²는 1.2와 1.15이다.

2. 임피던스 매칭과 공진주파수

전극 사이에서 전압의 균일한 분포를 위해 전극의 옆에 코일을 연결하였고, 임피던스 매칭을 위해 가변형 캐패시터를 연결하였다. 그림 3-(a)는 임피던스 매칭 회로의 연결을 보여주고 있으며, 그림 3-(b)는 양 전극사이에서 발생하는 캐패시터 성분을 나타내었다. 그림 3-(c)는 RF 인가 시 양쪽 전극 사이에 음이온과 양이온의 이동속도 차에 의해서 전극 주변에 음이온 보다 양이온이 더 많은 sheath 영역이 발생하며, 이 영역의 폭 d_s는 다음과 같다.[12]

$$d_s = \frac{42[\text{mmMHz}]}{\sqrt{\text{MHz}}} \quad (2)$$

sheath 영역을 제외한 영역을 plasma 영역이라고 할 경우 sheath 영역에 생기는 캐패시터 성분 C_s와 플라즈마 영역에 생기는 C_p, 그리고 plasma 저항 값인 C_R의 회로를 보여주고 있다. 그림 3-(d)는 그림 3-(c)의 등가 회로이다. 레이저가 동작하지 않을 경우에 전극 사이의 공진 주파수 f_{stop}는 다음과 같다.

$$f_{\text{stop}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(Cc + Cg)}} \quad (3)$$

여기서, C_g는 양전극사이에서 발생하는 캐패시터이고, C_c는 그 외 공진기의 캐패시터 성분으로 나타낼 수 있다. 윗 식을 이용해서 입력 주파수(RF)를 123 MHz로 사용하였으며, RF 여기 슬랩 도파관 레이저는 RF 방전 주파수에 따라 출력이 달라진다.[13] 그림 3-(c)에서 레이저가 동작할 경우 전극사이의 공진주파수 f_{run}는 다음과 같다.

$$f_{\text{run}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(Cc + C')}} \quad (4)$$

또한 그림 3-(d) 등가회로에서의 공진기 어드미턴스 Y는(L은 생략) 다음과 같다.

$$Y = \frac{1}{R'} + i\omega(C' + Cc) \quad (5)$$

여기서, C'값과 R'값은

$$C' = \frac{Cs + \omega^2 CbCs(Cp + Cs)Rp^2}{\omega^2(Cp + Cs)^2 Rp^2 + 1} \quad (6)$$

$$R' = \left(\frac{Cb + Cs}{Cs} \right) Rp + \frac{1}{\omega^2 Cs^2 Rp} \quad (7)$$

이다. (3)식과 (4)식에서 볼 수 있듯이 f_{stop}과 f_{run}이 같지 않다는 것을 알 수 있다. 이것은 단위체

적당 여기전압을 증가시키면 C'의 값과 Rp'의 값이 증가되기 때문이다.[14] 또한 입력 주파수(123 MHz)와 실제 레이저가 동작할 경우 플라즈마 내의 공진주파수가 다르기 때문에 반사파가 발생하는 원인이기도 하다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 전극을 폭을 40 mm로 하였으며, 가변형 캐패시터를 연결하였다.

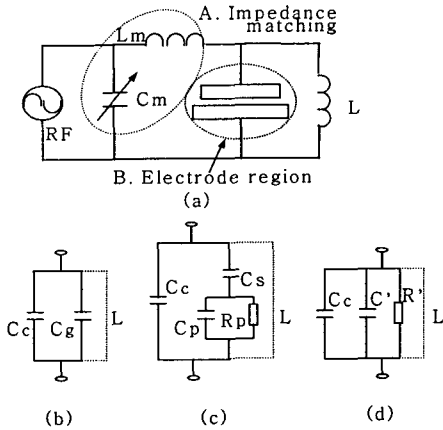


그림 3. 임피던스 매칭과 전극의 캐패시터
 (a) 임피던스 매칭회로와 전극
 (b) stop 레이저, (c) running 레이저
 (d) (c)의 등가회로

3. 최대 출력 값 예상

슬랩 도파관 CO₂ 레이저의 RF가 123 MHz, 가스 혼합 비율은 CO₂:N₂:He=1:1:3, 입력파워를 900 W, 가스의 압력을 40 torr로 할 경우 단위 체적당 최대 출력 값을 계산하였다.

양 전극사이에 플라즈마가 발생하는 구조는 그림 5와 같다. 먼저 양이온과 음이온의 속도 차에 의해서 양전극에 sheath 영역이 발생하게 되며 대부분의 레이저의 출력이 나오는 부분은 plasma 영역이다. 따라서 이 두 영역에 대해서 출력 값을 계산한 후 더해서 총 예상 출력 값을 구하였다. 이때 가스의 온도를 plasma 영역과 sheath 영역을 각각 400-500 K, 500-600 K라고 가정하였다.

R_{i-m}(i=1,3,4, m은 plasma와 sheath 영역을 의미)가 단위 체적당 여기(펄핑)을 이라 할 때 분호 함수 f(가정, Maxwell-Boltzmann 분포)와 진동 여기 단면적 Q_{ex}의 적분형태로 얻어질 수 있다.

$$R_i = n_e N_j \int_0^\infty V_e Q_{ex-1}(u) f(u) du \quad (8)$$

여기서 N_j는 가스의 밀도(j=CO₂ or N₂), u(eV)는 전자의 에너지이다. V_e는 전자 열 속도로서, 식 (19)와 같다.

$$V_e = \sqrt{\frac{2eu}{m_e}} \quad (9)$$

여기서, f_b(u)는 Maxwell-Boltzmann 분포 함수로서 다음과 같다.

$$f_b(u) = 2\sqrt{\frac{u}{\pi T_e^3}} \exp\left(\frac{-u}{T_e}\right) \quad (10)$$

T_e는 전자의 온도이다.

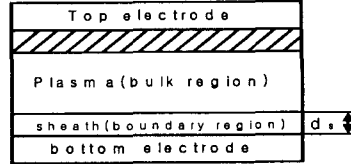


그림 4. plasma 영역과 sheath 영역

R_{3-m}와 R_{4-m}을 이용하여 plasma 영역과 sheath 영역에서 예상 출력 값은 각각 다음과 같다.

$$\frac{P_{plasma}}{S} \cong 2d_p hv(R_{3p} + R_{4p}) \quad (11)$$

$$\frac{P_{sheath}}{S} \cong 2d_s hv(R_{3s} + R_{4s}) \quad (12)$$

여기서, S는 전극의 면적이고, d_p와 d_s는 각각 plasma 영역과 sheath 영역의 두께이다. (R_{3p}+R_{4p})와 (R_{3s}+R_{4s})는 plasma 영역과 sheath 영역에서 상 준위 레벨에서의 총 펄핑 율이다. 계산결과, plasma 영역에서 2.3 kW, sheath 영역에서는 1.2 kW이었다. 따라서 총 출력 예상 값을 합한 값인 3.5 kW이다.

III. 실험 및 결과

실험 조건은 RF 입력 주파수가 123MHz이고, 가스의 혼합비율은 공진기 내의 압력은 10~60torr 까지 10torr씩 변화시켰다. 입력 파워는 100~900 W까지 100W 씩 증가시켜 가면서 출력 값을 측정하였다.

그림 5는 RF 입력 파워에 대한 레이저의 출력 값을 보여주고 있다. 압력이 증가 할수록 출력이 증가하는 모습을 볼 수가 있다. 최대 파워는 압력이 40torr, RF 입력 파워가 900W일 경우 negative의 경우 90.9W, positive의 경우 71.8W로 측정 되었다. 10torr의 경우 RF 입력 파워를 증가 시켜도 출력이 10 W 이상은 넘지 못하고 있다. 이것은 단위 체적 당 전자의 수가 제한되어 있기 때문에 RF 입력 파워를 증가 시켜도 출력은 한계가 있다는 것을 보여 주고 있다. 또한 40 torr 이상의 압력, 즉 50 torr와 60 torr의 경우에 40 torr 보다 더 작은 출력 값을 보여 주고 있다. 이것은 단위 체적 당 전자의 수는 많지만 이러한 전자들을 충분히 여기 할 수 있는 펄핑 에너지의 비율이 40 torr보다는 떨어진다는 것을 의미한다. 즉 900 W 이상의 RF 입력 파워가 필요하다.

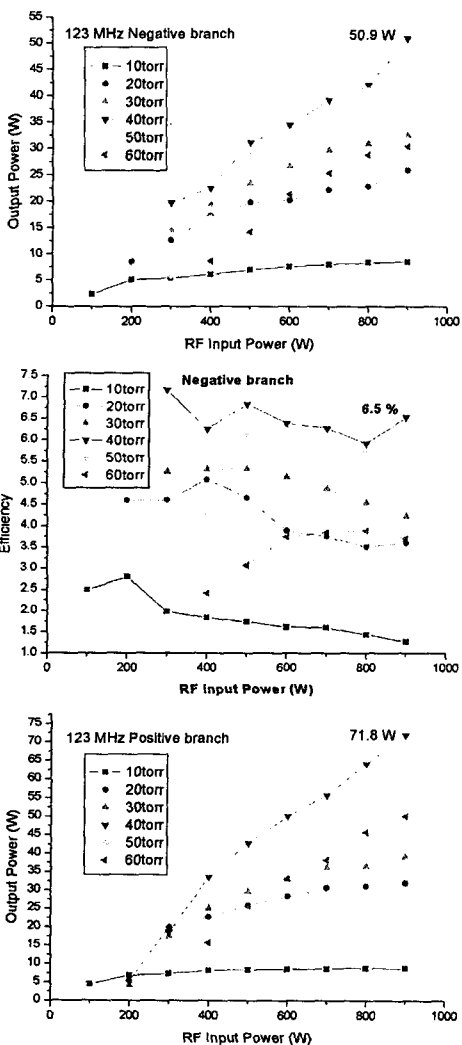


그림 5. 레이저 출력결과

그림 6은 RF 입력 파워에 대한 출력을 효율로 나타낸 그림이다. 두 공진기 모두 40 torr에서 가장 좋은 효율을 보여 주고 있으며, 최대 출력 파워인 900W에서의 효율은 각각 6.5%와 9.2%이다. 10~30 torr에서 RF 입력 파워가 200~400 W 이상이면 효율이 증가 하지 않고 감소하는 것을 볼 수가 있다. 40torr에서는 400 W 이상의 입력 파워에서는 효율이 크게 증가하지 않는 것을 볼 수가 있다.

그림 7은 RF 입력 파워와 추정압력에 대한 반사파를 나타내었다. 압력이 증가할수록 반사파가 작아지고, RF 입력 파워가 증가할수록 반사파가 커지는 것을 볼 수 있다. 이것은 공진기의 어드미턴스 값인 R'와 C'가 단위체적당 여기 전압을 증가 시키면 이 값들이 변화되어 임피던스 매칭 값

이 변화한다는 것을 볼 수가 있다.

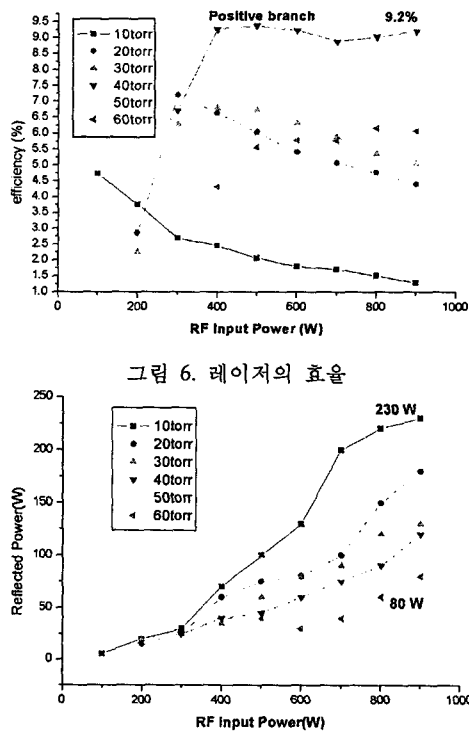


그림 6. 레이저의 효율

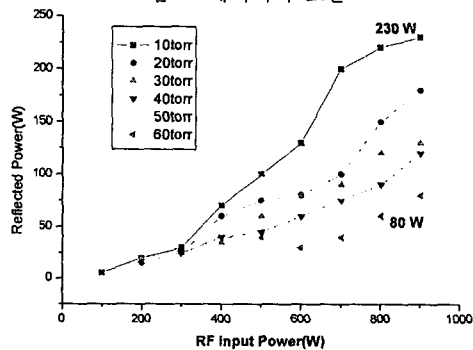


그림 7. 반사파 추정값

IV. 토 론

RF 여기에 의한 슬랩 도파관 CO₂ 레이저를 제작하여 그 출력을 실험하였다. 공진기의 크기는 40×2×400 mm이고, concave와 convex 미러를 사용 하였으며 불안정 공진기의 구조를 이루고 있다.

실험 조건은 RF 여기 주파수를 123 MHz, 가스의 혼합 비율은 CO₂:N₂:He=1:1:3, RF 입력 파워는 100~900W, 압력은 10~60torr까지 증가시키면서 레이저의 출력과 반사파를 측정하였다.

실험결과 최대 파워는 압력이 40torr, RF 입력 파워가 900W일 경우 negative branch 구조의 공진기와 positive branch의 공진기에서 출력은 각각 50.8 W와 71.8 W로 측정되었고, 단위 체적당 3.2 kW/m³, 4.5kW/m³, 효율은 6.5%와 9.2%로 측정 되었다. 단위 체적 당 여기 전압과 전자의 수가 증가 할수록 출력 또한 증가하는 것을 볼 수가 있었다. 하지만 효율은 고정된 압력에서 어느 이상의 RF 입력 파워가 되면 플라즈마 저항(R)과 플라즈마 캐패시터(C)의 값이 증가 되어 결국 임피던스 매칭 문제로 인한 반사파가 증가 된다는 것을 볼 수가 있었다. 따라서 향후 과제로는 임피던스 매칭 문제를 해결하는 것이 남아있다.

참고문헌

- [1] J.L.Lachambre, J.Macfarlane, Appl.Phys Lett, V32, 1978.
- [2] K.M.Abramski, E.F.Plinski, K.Baczyk, "New resonators for slab waveguide lasers", SPIE, 3186, 1997.
- [3] David Wheatley, "aA high power, High Modulation bandwidth CO₂ laser", SPIE, 3092.
- [4] A.Lapucci, Francesco Rossetti, "Working properties of compact RF-excited CO₂ slab lasers", SPIE, 3092.
- [5] A.I.Dutov, Yu.Evstratov, A.A.Kuleshov, "Slab waveguide high power pulsed Rf-excited CO₂ laser", Institute for laser physics, 1990
- [6] S.Kobayashi, "1 kW slab CO₂ laser excited by a self-excited RF generator", T. Murata, SPIE v.3092
- [7] Wester.R, Seiwert.s,"numerical modelling of RF excited CO₂ laser discharges", J. phys. D : Appl. Phys. 24
- [8] K.M.Abramski, Alan D.Colley, "High power multi dimensional waveguide CO₂", IEEE J. Quantum Electronics, V32, No.2, 1996.
- [9] Antonio Lapucci, Francesco Rossetti, Marco Ciofini, "On the longitudinal voltage distribution in RF-discharged CO₂ laser" IEEE J.Quantum Electronics V31, No 8, 1995.
- [10] K.M.Abramski, A.D.Colley, H.J.Baker, "CO₂ large area discharge laser using an unstable waveguide hybrid", Appl. Phys. Lett, 54, 1989.
- [11] K.M.abramski. H.J.Baker, A.D.Colley, "compact diffusion-cooled array and slab carbon dioxide lasers at the 1 kW level", "Proceeding of NAMP '92. Nagaoka", 1992.
- [12] Kim Y, Youn C E, Ra J W and Kim Y S, J. "Method for reducing the longitudinal voltage variation in transverse radio frequency discharge waveguide", Appl. Phys. V54, 1990.
- [13] D.HE and D.R. Hall, "Frequency Dependence in RF discharge excited waveguide CO₂ lasers", IEEE J.Quantum Electronics 20, 1984
- [14] Edward F. Plinski, Jerzy S. Witkowski, K.M.abramski, "Algorithm of RF excited slab waveguide laser design", J.Phys.D : Appl. Phys. V33, 2000.
- [15] Naoya Matsuoka, Shigeru,Yamaguchi, "Theoretical analysis of a radio frequency excited slab CO₂ laser", Jpn. J. Phys, V38, 1999.