

LW CO₂ 레이저의 온도 특성에

관한 해석

강 동 현*, 박 득 일, 이 주 희

경희대학교 전자공학과

The theoretical analysis of characteristics for temperatures in CW CO₂ laser

DONG - HEON KANG*, DEUG - IL PARK, CHOO - HIE LEE

Department of Electronic engineering, Kyung Hee Univ.

ABSTRACT

The output power is dependent of the vibrational level temperatures and wall temperature of the discharge tube in CW CO₂ lasers.

The method postulates the introduction of a vibrational temperatures T_i for each vibrational mode. The vibrational and wall temperature are determined by the equations of the vibrational energy balance and thermal conductivity.

1. 서 론

CO₂ 레이저는 중 적외선(mid-infrared) 영역의 대출력, 고효율 레이저로서 여러 분야에 응용되어왔다. CO₂ 레이저 메질을 여기시키는 데는 일반적으로 연속 파진(CW; Continuous Wave)이나 혹은 펄스의 전기적 방전을 많이 사용하여 왔다.

CO₂ 레이저 반응 기구의 모델링은 진동온도에 대한 에너지의 관계를 나타낸 Six temperature 방법과 펄스 TEA 레이저의 출력에 대한 이론 해석과 fast - axial - flow 시스템의 전기적으로 여기된 레이저의 이론 해석이 Beverly 에 의하여 보고되었으며[2], CW 의 이론해석도 저압력에서의 이득분포에 대한 CO₂ - N₂ - He 시스템의 5 가지 온도 모델이 구성되어 있다[1]. 1980 년 fast - transverse - flow의 이론 해석이 Armandillo 와 Kaye에 의해[3], 1984년 slow - axial - flow CO₂ 레이저의 에너지 수밀도와 온도에 대한 모델링이 Scott 와 Mayers에 의해 보고되었다[4].

본 연구는 CW CO₂ - N₂ - He 레이저의 대출력 고효율을 위한 이론적 해석을 위하여 진동 온도(Vibrational Temperatures)에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 모드를 개발하여 Sealed - off 경우의 각 에너지 레벨의 진동 온도에 대한 에너지

수밀도와 방전관 벽의 온도가 출력에 미치는 영향에 대한 해석을 하였다.

2. 모델의 전개

CO₂ 레이저의 이득과 출력은 CO₂ 분자의 진동 회전(Vibration - Rotation) 레벨에서의 밀도에 의존하며 일반적으로 레이저의 수학적 모델은 여러 진동 모드에 저장되는 전체 에너지의 계산으로 행해진다. 각 진동 모드에 관계된 에너지와 온도에 대한 방정식은 아래의 가정에 의해 나타내었다.

- 1) Translation 과 Rotation은 각 모드의 에너지 간격 분포가 가스 온도 T를 가지고 볼츠만 평형 상태에서 결합되어 있다.
- 2) 유도 방출(Stimulated Emission)은 단지(001) → (100)밴드에서의 전이에서만 발생한다.
- 3) 자연 방출(Spontaneous Emission)과 분자의 해리(Dissociation)는 무시한다.
- 4) 방전관 내부의 가스 압력은 시간에 대하여 일정하다.
- 5) 전자 여기율과 회전 레벨의 분포는 볼츠만 분포로 가정한다.

본 논문의 모델은 Fig. - 1에서 보여주는 바와같이 네개의 모드에 에너지에 근거를 두며, CO₂ (100), (020), (001) 모드에 관계된 에너지를 각각 E₁, E₂, E₃로 표현하며 각 모드에 관계된 진동 온도는 T₁, T₂, T₃로 나타낸다. 또한 N₂ 진동 모드에 관계된 에너지와 진동온도를 각각 E₄, T₄로 나타낸다[5]. Manes 와 Seguin의 식은 짧은 방전 시간에 대한 펄스의 모델링을 하였기 때문에 방전관 내부의 가스 온도 상승을 고려하지 않았다. 그러나 CW의 경우에는 펄스에 비하여 충분히 긴 방전 시간을 가지므로 가스 온도를 변수로서 포함시키며 이는 레이저의 출력에 큰 영향을 미친다[6].

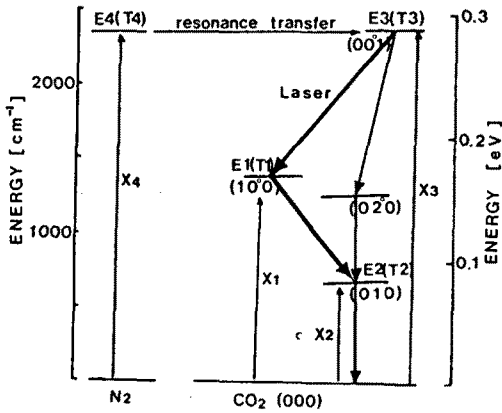


Fig.1. Energy level diagram for the CO₂ laser model

각 진동 레벨에 관계된 진동온도에 대한 해석은 이완 시간에 대한 계산과 이득 속정에 대한 계산으로 표현될 수 있다.

어떠한 이완 시간은 τ 로 표현되며 이 이완 시간의 크기는 Ref.[7] 에 나타나 있다. 이완 시간은 가스 온도와 어떤 진동온도에 의존하는데, 일반적으로 이러한 진동 온도들은 서로 다르며 또한 가스 온도화도 다르다. 많은 레벨의 밀도 (Population)에 대한 시스템의 밸런스 방정식은 각 레벨 그룹에 대한 간단한 진동 에너지 방정식으로 나타낼 수 있으며 진동 온도는 어떤 모드에 따른 레벨에 있어서의 밀도 반전의 본포 (Population Inversion)에 의해 얻어진다.

CO₂ / N₂ / He 혼합가스에서 전자는 N₂ 의 레벨로 직접 여기되며 이것은 N₂ 에서 CO₂ 분자의 (001) 레벨로 진동 에너지의 resonant 교환에 의한 것이다. CW 의 경우에 있어서 CO₂ 의 각 진동 모드는 그 자신의 에너지를 가지고 있으며, 단위 체적당 에너지의 양 E_i (CO 분자의 각 모드 i = 1, 2, 3 ; N₂ 분자의 모드 i = 4) 는 아래의 식(1)로 나타낸다[8].

$$E_i = h\nu_i \frac{X_i}{(1 - X_i)^2} N_{CO_2}, E_2 = h\nu_2 \frac{2 X_2}{(1 - X_2)^2} N_{CO_2}$$

$$E_4 = h\nu_4 \frac{X_4}{(1 - X_4)^2} N_{N_2} \quad (1)$$

여기서 N_{CO₂} 와 N_{N₂} 는 기저 상태에서 단위 체적당의 CO₂ 와 N₂ 의 분자수를 말하며,

$X_i = \exp(-h\nu_i / kT)$, ν_i 는 어떤 진동 모드의 기본 주파수이다.

만약 CO₂ 대칭 신속진동 모드(100) 과 밴딩 모드(020) 의 진동온도 T₁, T₂ 가 충분히 작다면 (100)레벨의 확산(diffusive)에 의한 감소처럼 비대칭 신속진동 모드로 역전되는 에너지 전달은 제거할 수 있으며 진동 온도 T_i 는

식 (2) 와 같이 나타낼 수 있다. (i = 1, 2)

$$T_i = \frac{h \nu_i}{k \ln(N_{CO_2} h \nu_i / E_i + 1)} \quad (2)$$

CW 시스템에 대하여 ν_1 과 ν_2 의 진동은 같은 온도 T₂에 의하여 표현되며, 진동 온도처럼 translational 이나 rotational 에너지는 그들의 온도에 의하여 표현되지만 회전 이완시간(rotational relaxation time)은 매우 작기 때문에 평형 상태에서 고려되어질 수 있으며 에너지는 같은 온도 T 로서 표현된다. 반면 레이저 시스템에 대하여 T₃ 는 Radiation field 에 의하여 T₂ 에 결합되어 있으며 레이저 방전관에서의 전체 Radiation field 는 반전에 의하여 평형 상태에 있기 때문에 밀도반전은 Outcoupling, 흡수, 외절정의 모든 손실의 양과 같은 이득에 의하여서만 결정된다. 즉 T₃ 는 하위 레벨의 밀도 N₀₀₁에서 구할 수 있으며 T₃에 관한 방정식을 식(3) 과 같이 표현된다.

$$T_3 = \frac{h \cdot \nu_3}{k \cdot \ln\left(\left(1 - e^{-\frac{h\nu_3}{kT_3}}\right) \times \left(1 - e^{-\frac{h\nu_3}{kT_2}}\right)^2\right)} \quad (3)$$

CW 시스템에서의 가스의 온도는 방전에 인가되는 에너지의 양과 손실되는 양이 일치되는 평형 상태의 값으로 방전에 인가되는 에너지의 손실이 방전관 벽을 통한 열의 양이라고 가정한다면 손실되는 에너지는 식(4) 와 같이 나타낼 수 있다[9].

$$Q(T) = (T - T_w) 18.9 \lambda_{mix}(T) \quad (4)$$

T_w는 방전관 벽의 온도를 나타내며, $\lambda_{mix}(T)$ 는 혼합 가스의 열 전도도 계수이다.

이상과 같은 모델링의 전체 흐름도를 Fig. - 2 에 나타내었으며 프로그램은 FORTRAN 으로 작성

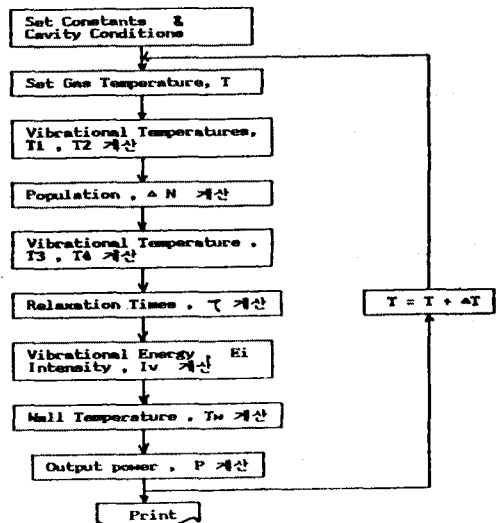


Fig.2. Flow Chart of CW CO₂ Laser Simulation

하였다.

3. 계산 결과

본 모델링에 사용한 방전관의 조건을 표 - 1에 나타내었다. 표에서 나타난 전자 여기율과 자연 수명시간(Spontaneous Lifetime)은 Ref.[7]의 값을 적용하였다. 표 - 2에서 CO₂ (100)과 (020) 레벨의 진동온도 T₁, T₂는 Ref.[10]에 나타난 값과 거의 일치함을 알수 있다.

Fig. - 3은 가스 온도 T가 증가함에 따라 T₂의 값이 거의 선형적으로 증가함을 알수 있고 T₃, T₄도 T와 더불어 점차 증가함을 알수 있다. T₄가 커질수록 hot electron에 의한 전자 여기는 더욱 어려워지고 더우기 ν₃ 진동의 승물적인 발여기(deexcitation)는 T의 증가와 더불어 증가한다. Fig. - 4는 방전 전류에 대한 출력의 모델값과 문헌[4] 상에 나타난 실험치를 비교한 것으로 곡선에서 알수 있듯이 방전전류 40 mA에서 최대출력을 얻을수 있었으며, 60 mA 이상에서는 다시 감소하는 것을 볼수 있다. 이는 방전기체의 냉각능력을 초과하는 입력 에너지의 증가때문이다. 그러므로 레이저의 출력을 높이기 위해서는 가능한한 기체의 온도를 낮추어 밀도 반전의 차가 큰 영역에서 방전을 해야한다. 예를들어 CH CO₂ 레이저에서 냉각기구로 Water Jacket를 설치할 경우, 출력을 일정하게 방전시키기 위해서는 물의 온도를 - 60 °C로 계속 유지시켜야 한다[11]. Fig. - 5는 방전관 벽(Wall)의 온도에 대한 출력을 나타낸 것이며, 벽의 온도가 증가함에 따라 출력이 점차 감소함을 알수 있다.

표 - 1. Characteristics of no - flow laser in Simulation

| Parameter | value | unit |
|----------------------|----------------------|-----------------------|
| Partial Pressures | | |
| CO ₂ | 1 | Torr |
| N ₂ | 2 | Torr |
| He | 3 | Torr |
| Mode area | 0.95 | cm ² |
| Mirror Reflect. | 0.95 | |
| Tube length | 50 | cm |
| Tube radius | 1.2 | cm |
| Discharge length | 55 | cm |
| Discharge radius | 0.8 | cm |
| E / P | 9.8 | volt/cm torr |
| Spontaneous lifetime | 3 | Seconds |
| X1 | 4 × 10 ⁻⁹ | cm ³ / sec |
| X2 | 4 × 10 ⁻⁹ | cm ³ / sec |
| X3 | 5 × 10 ⁻⁹ | cm ³ / sec |
| X4 | 2 × 10 ⁻⁸ | cm ³ / sec |

표 - 2. Vibrational temperatures [K] of N₂ and CO₂ (100),(020),(001) level (CO₂ / N₂ / He = 2.5 / 3.5 / 12) torr

| T | T1 | T2 | T3 | T4 |
|-----|-----|-----|------|------|
| 400 | 415 | 415 | 857 | 1012 |
| 500 | 514 | 514 | 1025 | 1147 |
| 600 | 613 | 613 | 1203 | 1305 |
| 700 | 712 | 712 | 1387 | 1476 |

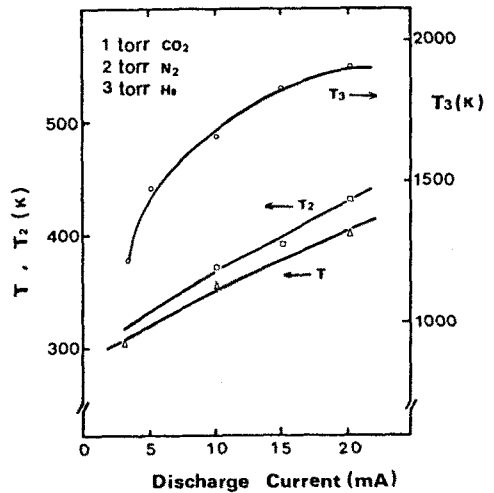


Fig.3 Plot of T₃, T₂ and T as a function of discharge current

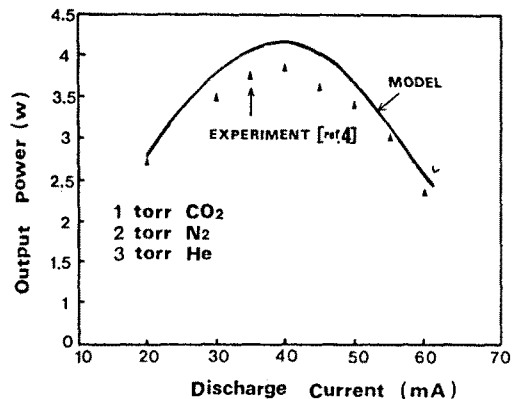


Fig.4 Output Power of CO₂ laser as a function of discharge current

4. 결 론

전기적인 방전(Electric Discharge)에 의한 10.6 μm 대역 CW CO₂ 레이저의 출력은 CO₂ (001) 과 (020) 레벨의 진동온도와 방전관 벽의 온도에 영향을 받으며, T 와 T_w 가 증가함에 따라 출력이 어느 한계점에서 점차 감소함을 알수 있었다. 이의 해결점으로는 효율적인 냉각방법을 구상하여야 하며, 또한 가스 순환(Gas Flow)에 의한 방법을 고려해야한다. 덧붙여서 가스 흐름을 고려할 경우 뜨거운 가스가 방전관을 빠져나갈 때의 열량 손실과, 방전시 분자들이 하위 레벨에서 상위 레벨로 여기될때 가스의 흐름에 의하여 소모되는 에너지에 대한 이론 해석이 필요하며 이 이론 해석에 병행한 실험이 요구된다.

4. 참고 문헌

1. A.R. Davies, "TLASER - A CO₂ LASER KINETICS CODE", *Comp. Phys. Comm.*, 10, 117 (1975)
2. R.E. Beverly III, "Kinetics modelling of a fast-axial - flow CO₂ Laser", *Opt. Quan. Electron.*, 14, 25 (1982)
3. E. Armandillo and A.S. Kays, "Modelling of transverse - flow CW CO₂ lasers: theory and experiment", *Appl. Phys.*, 13, 321 (1980)
4. M.W. Scott and G.D. Myers, "Steady - State CO₂ Laser model", *Appl. Optics*, 23, 2874 (1984)
5. R.Y. Auyang and J. Reid, "High Vibrational Temperatures in Optically - Pumped CO₂", *IEEE J. Quantum Electron.*, 24, 573 (1988)

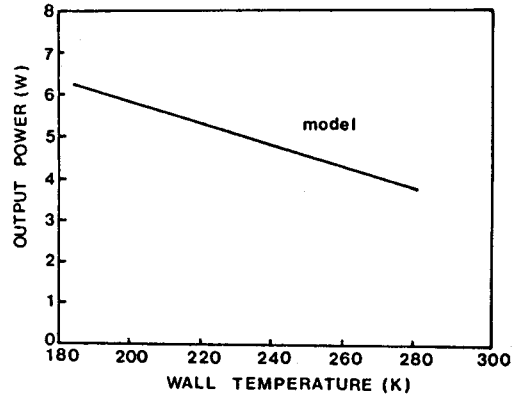


Fig.5. Predicted output power of CO₂ laser as discharge tube wall is cooled

6. K.R. Maness and H.J. Seguin, "Analysis of the CO₂ TEA Laser", *J. Appl. Phys.*, 43, 5073 (1972)
7. K. Smith and R.M. Thomson, *Computer Modelling of Gas Lasers* (Plenum, New York, 1978)
8. B.F. Gordiets, et al., "Kinetics of Physical Processes in CO₂ Lasers", *SOVIET PHYSICS JETP*, 26, 1039 (1968)
9. J.P. Holman, *Heat Transfer* (McGraw-Hill, New York, 1976), 183-187
10. M.J. Mittleman, *The CO₂ Laser* (Springer Series in Optical Sciences, New York, 1987), 53, 8 - 91
11. A. J. Demaria, "Review of CW High - Power CO₂ Lasers", *Proc. IEEE*, 61, 731 (1973)