

TEA Pulse CO₂ Laser에서의 방전연구

김강욱, 노영수*, 조연욱*, 오철환**, 노홍근***
*한국전기연구소 고전압연구실, **경북대사대물리학과, ***영남대물리학과

Study of the Discharge in a TEA Pulse CO₂ Laser

K.W.Kim, Y.S.Roh*, Y.O.Cho*, C.W.Ch**, H.K.Roh***
*Korea Electrotechnology Research Institute
Kyungpook Univ. , *Yongnam Univ.

Abstracts

CO₂ lasers are used in the various industrial fields since the development of CO₂ laser in 1964. It is because CO₂ laser is more efficient, more powerful than other lasers and CO₂ laser light of wavelength 10.6μm interacts with materials well. Thus CO₂ laser is used for industrial application such as cutting, punching, welding, surface treatment of metal and nonmetallic materials, isotope separation, etc.

Already other research institutes including some universities have recognized the advantages and importance of the CO₂ laser, and studied it.

However, its technology is in elementary state yet. Therefore, we started this study to develop present CO₂ laser technology more highly and to fit it.

The main purposes of this study are to acquire various technologies such as high voltage, high pressure glow discharge, vacuum and optical cavity design.

1. 서론

CO₂레이저는 현존하는, 가장 효율이 좋고 높은 출력을 낼 수 있는 레이저중 하나이다. 1964년 Patel에 의하여 처음으로 개발된 이후 질소와 헬륨을 첨가하여 효율이 높아졌으며, 현재 대기압 이상의 높은 압력에서 레이저 발진이 실현되어 CO₂ 레이저는 대출력 레이저로 주목을 받고 있다.

CO₂레이저는 분자의 진동준위 사이에서 일어나는 전이에 의해 주로 9.6μm와 10.6μm 근처의 적외선 영역의 빛을 증폭시킨다. CO₂레이저는 높은 출력때문에 비금속, 세라믹 가공, 금속의 용접, 절단, 구멍뚫기, 열처리 등에 쓰이고 의료가기로서 레이저메스, 측정용으로 대기오염 측정에도 쓰인다. 또한 원적외선 레이저

의 발진, 동위원소 분리에도 이용된다.

본 연구에서는 가스레이저 개발연구의 시작으로 TEA CO₂레이저를 제작하고 레이저발진의 요건이 되는 글로우 방전을 안정하게 실현하는데 중점을 두었다. 제작된 방전체적은 10x60x3.5cm이고 1단의 변형된 Marx Bank System으로 전압을 인가하고 스파크어레이를 선진리창자로 사용하여 균일한 글로우 방전을 얻었고 광학적공진기로 레이저발진을 가능하게 하였다.

2. 본론

(1) CO₂레이저 발진의 비율식(rate equation)

CO₂레이저는 진동-회전 에너지준위의 전이에 의하여 발진된다. 그러나 진동에 의한 에너지준위의 차가 회전 에 의한 것보다 훨씬 크기 때문에 진동준위 사이의 전이만을 고려하여 비율식을 세웠다.

릿준위(0 0⁰1)의 밀도n₁에 대한 비율식은 다음과 같다

$$\frac{dn_1}{dt} = \alpha n_0 + K(Nn_0 - n_1 N_0) - s \cdot q(n_1 - n_2) - K_{13} n_1 \quad (1)$$

이 때

n₁ : (0 0⁰1)상태의 밀도

α n₀ : 전자에 의하여 (0 0⁰1)상태로 들뜸(pumping)

K : 질소의 들뜬상태에서 CO₂들뜬상태로 이동

N : 질소분자의 들뜬상태

n₀ : CO₂분자의 바닥상태

N₀ : 질소분자의 바닥상태

s : 유도전이율

q : 광자 밀도

K₁₃ : (0 0⁰1)상태에서 (0 1⁰0)상태로 이동비율을 나타내는 상수

식(1)의 우변 첫째항은 전자에 의한 릿준위로의 들뜸이고 둘째항은 CO₂와 N₂사이의 공명에너지 전달항이며, 셋째항은 각 전이선에서 일어나는 유도방출에 의한 항이다. 마지막 항은 n₁에서 (0 1⁰0)으로 직접 일어나는 손실의 항이 된다.

준위 (1 0⁰)의 밀도 n₂에 대한 비율식은 다음과 같다.

$$\frac{dn_2}{dt} = s \cdot q (n_1 - n_2) - K_2 n_2 \quad \text{식 (2)}$$

이 때 K₂ : (1 0⁰)상태에서 (0 1⁰)상태로 이완하는 비율을 나타내는 계수

준위 (0 1⁰)의 준위 n에 대한 비율식은 다음과 같다.

$$\frac{dn_3}{dt} = \gamma n_0 + K_2 n_2 - K_3 n_3 \quad \text{식 (3)}$$

이 때 γ : 바닥상태에서 n₃상태로의 전자에 의한 들뜸계수
K₃ : n₃에서 바닥상태로의 이완을 나타내는 계수

식 (3)의 우변 첫째항은 전자에 의해서 바닥상태에서 n₃로 들뜨워진 밀도를 나타내며, 둘째항은 n₂에서 n₃로 이완된 밀도를 나타내며, 셋째항은 바닥상태로의 이완을 나타낸다.

들뜬워진 질소의 밀도분포 비율식은 다음과 같다.

$$\frac{dn}{dt} = \beta N_0 - K (N_0 - n_1 N_0) \quad \text{식 (4)}$$

이 때 β : 질소의 들뜸 계수
식 (4)의 우변 첫째항은 질소의 첫진동 상태의 들뜸항이며, 둘째항은 CO₂와 N₂의 공명에너지 전달항이다. 한편 광자 밀도의 변화는 다음과 같다.

$$\frac{dq}{dt} = s \cdot q (n_1 - n_2) - W q + D n_1 \quad \text{식 (5)}$$

식 (5)의 우변 첫째항은 유도방출의 항이며, 둘째항은 공진기 내의 손실항, 셋째항은 자발적전이의 항이다. 여기서 각 에너지 상태에 대한 밀도의 비율식은 다음과 같은 구속조건을 가진다.

$$N_{tot} = N_0 + N_1 \quad : \text{질소}$$

$$n_{tot} = n_0 + n_1 + n_2 + n_3 \quad : \text{이산화탄소}$$

(2) 선전리된 자기지속적 방전

높은 압력에서의 레이저 펌핑을 위한 글로우 방전 연구가 1970년대 이후 꾸준히 수행되어 큰 기술의 변화를 가져왔다. 이 연구의 주된 내용은 어떻게 방전이 형성되고, 어떻게 유지되며, 어떤 요인이 글로우에서 아크로 변하게 하며, 선전리 자기지속적 방전의 각 과정에서 선전리의 역할이 무엇인가에 대한 것들이었다.

여기서는 선전리의 보조에 의해 주방전에 의한 글로우 방전이 형성되고, 그것이 아크로 천이하거나 글로우로 유지되는 물리적 과정을 간단히 설명하기로 한다.

그림 1-a은 선전리 글로우방전의 개념도이고 그림 1-b는 선전리에 의한 글로우의 형성과 지속, 아크로의 천이에 대한 시간에 따른 전압, 전류 파형을 도시하고 있다. 그림 1-b의 시간에 따른 변화 과정은 다음과 같이

설명할 수 있다.

1)형성(formation) : 이 과정은 방전체적의 선전리에 의하여 시작된다. 고전압이 인가되면 전극에는 방전임피던스가 펄스 에너지 발생기(PFN)의 임피던스와 같아질 때까지 전자밀도와 전류가 커진다.

2)안정상태(steady state) : 이 때에는 방전전압, 전류 전자밀도가 거의 일정하게 된다. PFN이 매칭되었을 때 방전되는 펄스 길이는 PFN의 전기적인 펄스 길이와 같게 된다.

3)소멸 혹은 아크 형성(decay or formation) : 아크가 발생하면 방전은 단락되어 전류가 매우 높은 전도도로써 국부적으로 흐르게 되고, 다른 영역의 전류는 소멸된다.

(3) CO₂레이저의 설계 및 제작

본 연구에서 구성한 CO₂레이저 시스템이 그림 2에 도시되어 있다. 사용된 혼합기체는 일반적으로 많이 이용되는, CO₂, N₂, He의 비율이 1:1:8인 것이다. 방전용기는 30mm 두께의 아크릴을 사용하여 제작함으로써 방전이 일어나는 현상을 외부에서 쉽게 관측할 수 있도록 하였고 길이가 800mm, 폭이 390mm, 높이가 300mm의 직육면체 모양으로 제작되었다. 공진을 일으켜 빛을 증

폭시키는 반사경으로서는 오목한 전반사 반사경(재료: Mo, 반사율:100%, 직경:2")과 편평한 반반사 반사경(재료:ZnSe, 반사율:65%, 직경:1.5")을 사용하였다.

본 연구에서는 일반적으로 이용되는 부루스터 창을 사용하지 않고 10.6μm의 레이저 빔을 투과하는 투과창(재료:ZnSe, 직경:2")을 사용하였다.

레이저가 발전하기 위해서는 방전이 아크로 진행하지 않아야 하는데 이를 위해 우선적으로 진공상태가 양호해야만 한다. 왜냐하면 진공상태가 양호하지 않으면 공진기 내에 산소가 남아 있게 되는데, 이 산소가 아크방전을 일으키는 치명적인 원인이 되기 때문이다. 공진기의 진공 유지를 위해 측면 모서리 부분을 계단식으로 정밀하게 가공한 다음 에폭시접착제를 고르게 발라 접합하였다. 또한 윗면과 아랫면은 실리콘 고무판을 아크릴 사이에 두고 볼트로 고정하였다.

자외선을 발생시키는 선전리장치로 스파크어레이를 설계, 제작하였다. 이것은 에폭시 기판에 등판을 입힌 후 에칭으로 설계된 형상을 제작하였다. 스파크어레이는 강력한 자외선을 발생시켜 선전리를 쉽게 할 수 있고 제작이 용이한 장점이 있으나, 재질이 약해 수명이 짧다는 단점이 있다.

반사경 사이에서 증폭, 발전된 빛살은 포톤 드래그(photon drag monitor)에 의해 감지되고 오실로스코프(oscilloscope; TEK2440)에 연결되어 빛살의 펄스모양을 볼 수 있도록 하였다. 그리고 빛살의 에너지와 파워는 칼로리미터(calorimeter)로 감지하여 디지털파워미터(digital power meter)로 직접 읽을 수 있도록 하였다.

본 연구에서 요구되는 고전압, 전류를 스위칭하기 위

하여 그림3과 같은 형상의 스파크갭스위치(spark gap switch)를 제작하였다.그림에서 볼 수 있듯이 방전 부위가 손상되는 것을 막기 위해 구리와 텅스텐의 합금(Cu:W=3:7)을 원통과 유사한 모양으로 가공하여 황등과 볼트로 연결하였다.

기체의 방전은 기체의 종류와 압력, 전극의 재료와 모양,전극간의 간격 그리고 인가된 전압과 외부회로의 특성 등에 따라 방전 특성이 매우 다르게 된다. 가스 레이저는 펌핑(pumping)이 효율적으로 이루어지기 위해 방전이 글로우로 진행되어야만 한다. 그러나 TEA Pulse CO₂ 레이저의 경우 방전이 고압에서 이루어지기 때문에 글로우 방전을 유지하기가 매우 어렵다.글로우 방전이 되기 위해서는 우선 전장의 세기가 균일해야 하는데,이를 위한 전극의 형상에 대하여 많은 사람이 연구하였다. 본 연구에서는 일반적으로 TEA Pulse CO₂ 레이저에 많이 활용되고 있는 창(T.Y.Chang)의 모델에 따라서 전극을 컴퓨터로 설계하였고, 커터(cutter)를 만들어 N.C.머신(machine)으로 제작하였다.

본연구에서 구성된 전원장치가 그림4에 나타나 있다. 글로우 방전이 일어나기 위해서는 주전극과 선전리 장치에 인가되는 펄스가 시간적으로 지연되어야 하는데, R, C를 조절하여 각 펄스의 상승시간(rising time)을 다르게함으로써 펄스기 지연되는 효과를 얻었다. 또한 펄스의 폭은 레이저가 발전하는데 매우 중요한 역할을 하는데 대략 1 μ s정도이어야 한다.

3. 실험 및 결과

전극의 간격을 35mm로 고정하고 방전실험을 하였는데 방전의 경향은 세가지로 나타났다: 이것은 첫째, 아크 방전 둘째, 글로우방전 셋째,글로우방전에서 아크방전으로 천이되는 경향 등이다.

아크방전은 육안으로 관찰할 수 있고 실험에 사용된 전극의 상태가 매우 양호하기 때문에 단지 전극의 수평상태를 조정함으로써 아크를 제거할 수 있었다.글로우방전은 매우 짧은 시간에 일어나고 스파크 어레이의 빛이 매우 강렬하기 때문에 관찰하기가 어렵다.그래서 방전의 특성을 전기적 신호로 관측하기 위하여 전극양단에 인가되는 전압을 분압기(비율,320:1)로 잡고, 흐르는 전류는 변류기(비율,40:1)로 감지하여 오실로스코프로 관측하였다. 그림5는 관측된 전압,전류의 파형을 촬영한 사진이다. 그림5-a에서 볼 수 있듯이 글로우방전일 때는 전압은 방전이 시작될때 조금 감소하고 방전이 끝날 때까지 거의 일정하다는 것을 알 수 있다.그림5-b는 글로우방전에서 아크방전으로 천이되는 경우이다. 전압은 방전이 아크로 천이되는 순간 급격히 감소하고 전류는 매우 증가되는 것을 알 수 있는데 이것은 아크 방전시 전류가 국부적으로 집중되어 흐르기 때문이다. 글로우방전에서 아크로 천이되는 경우,조건에 따라 글로우의 지속시간이 다르지만 일단 아크방전으로 천이하게 되면 전체 에너지가 매우 적어지므로

레이저가 발전하기가 매우 어렵게 된다.

앞에서 언급하였듯이 레이저가 발전하기 위해서는 글로우방전이 유지되는 것과 펄스의 시간이 매우 중요하다. 왜냐하면 펄스의 시간이 짧아야 레이징이 일어나는 동안 충분히 많은 에너지를 전달할 수 있기 때문이다. 그림5와 같은 파형의 펄스는 시간이 약 10 μ s으로 길어서 레이저가 발전하지 못하였다. R,C의 용량을 조절하여 펄스의 시간을 줄여 실험을 계속한 결과 펄스의 시간이 약 2 μ s정도가 되었을 때 레이저가 발전하였다. 이 때의 파형이 그림6에 나타나 있다.

발전된 레이저 빔의 모양은 조금 찌그러진 원형으로 그 직경이 대략 20mm정도였다. 빔에너지는 칼로리미터로 감지하여 측정하였는데,압력이 500Torr에서 인가전압의 변화에 따른 출력에너지가 그림7에 도시되어있다.그림에서 볼 수 있듯이 인가전압 54KV에서 에너지가 약 300mJ로 나타나 전체 효율이 1.5%정도 되었다. CO₂ 레이저가 효율이 매우 높다는 점을 생각해보면 효율개선을 위한 연구가 향후의 중점적인 과제로 남아있다.

참 고 문 헌

1. Laurence E.Kline Louis J.Dence ; " Preionized Self-sustained Laser Discharges " ; Applied Atomic Collision Physics,Vol.3, Gas Laser, 1982 , Academic Press
2. Orazio Svelto ; Principles of Lasers, 2nd Ed., 1982, Plenum Press
3. Joseph T.Verdeyen ; Laser Electronics , 1981, Prentice-Hall
4. 김철민 ; 맥동 TEA CO 레이저의 다중전이선 발전, 1986, 서강대 물리학과 박사학위 논문
5. 이현주 ; 황류 및 황여기형 연속출력 탄산가스레이저에 대한 연구, 1989 , 서울대 전자핵공학과 박사학위 논문
6. Amnon Yariv ; Optical Electronics , 3rd Ed. , 1985, CBS College Publishing
7. T.Y.Chang ; " Improved Uniform Electrode Profiles for TEA Laser and High-voltage Application ", Rev. Sci. Instrum.44(4),405p,1973
8. R.B.Lancashire,D.L.Alger,E.J.Manista,J.G.Slaby ; " The NASA high-Power Carbon Dioxide Laser - A Versatile Tool for Laser Application ", SPIE Vol.186, Industrial Applications of High Power Laser Technology, 11p, 1976

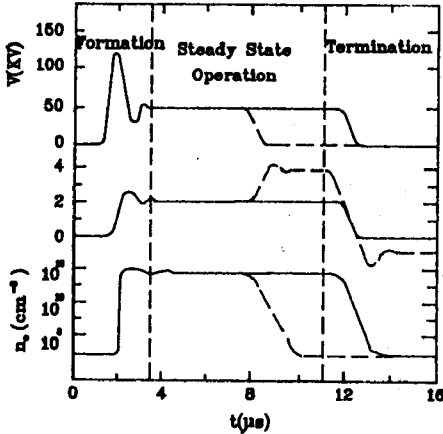
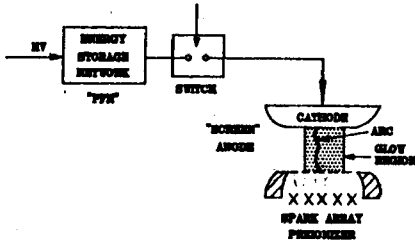


그림 1 (a) 선전리턴극로 유발전의 개념도
(b) 방전의 시간에 따른 밀도의 변화과정

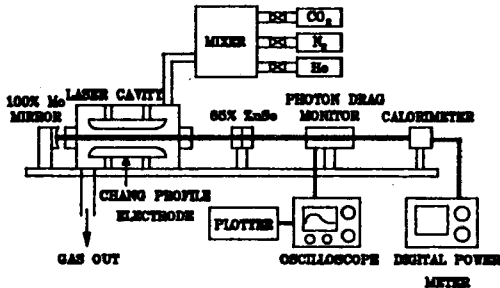


그림 2 레이저 시스템의 구성도

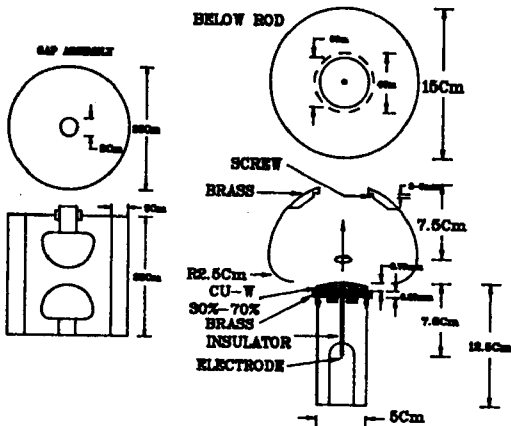


그림 3 스파크 갭 스위치 (Spark Gap Switch)

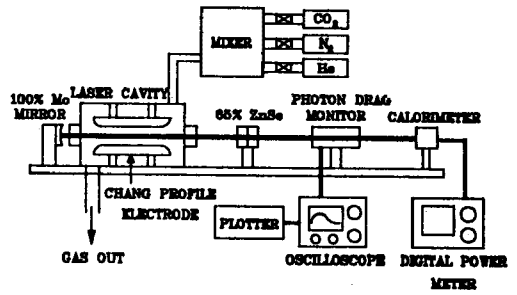


그림 4 레이저 시스템의 전원장치

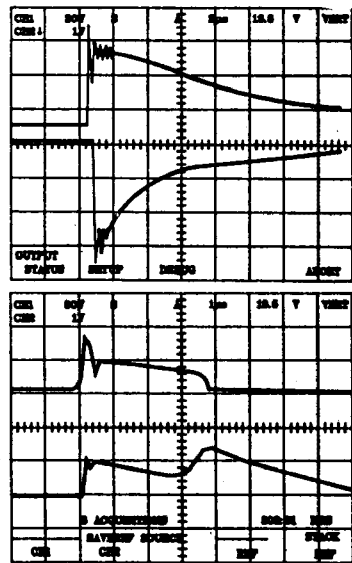


그림 5 (a) 방전 발생시의 전압 파형
(b) 방전 발생시의 전류 파형

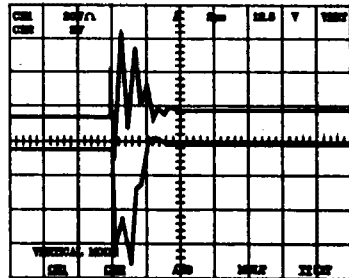


그림 6 레이저가 발진할 때의 전압, 전류 파형

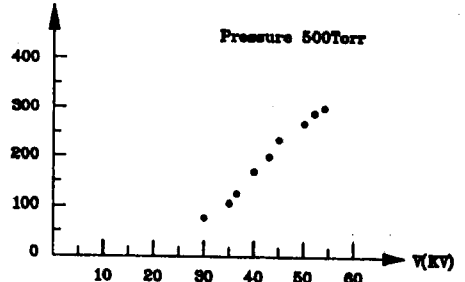


그림 7 인가전압에 따른 출력 빔 에너지