

원적외선 레이저 펌핑용 가변파장 CO₂ 레이저

진운식 · 정기형

서울대학교 원자핵공학과

이 현 주

제주대학교 에너지공학과

(1990년 6월 26일 받음)

메틸알코올 레이저의 여기용으로 저속충류형의 가변파장 CO₂ 레이저를 제작하였다. 파장가변은 ZnSe Brewster 창과 반사 회절격자를 사용하였으며, 반사 회절격자는 **Blaze wavelength 10.6 μm, 100 grooves/mm** 인 평면형이다.

실험은 CO₂ 레이저의 연속발전 출력특성을 살펴보고, CO₂ 레이저의 전 발전구간을 파장가변시켜 얻어진 출력분포를 CO₂ 레이저의 이득 곡선과 비교하였다. 연속발전 출력은 기체 혼합비 CO₂ : N₂ : He = 1 : 3 : 10, 전류 55 mA, 압력 14 torr 일 때 100 W 를 얻었다. 가변된 파장은 10.4 μm 영역의 R(6)-R(38), P(6)-P(36), 9.4 μm 영역의 R(10)-R(32), P(10)-P(38)의 약 60 여개의 회전선이 발전함을 확인하였고, 이 때의 파장은 9.3295 μm 에서 10.7648 μm 까지 변화하였다. 각 영역에서 얻어진 출력분포는 CO₂ 레이저의 이득곡선과 잘 일치하였고, 최대 출력은 20 W 정도였다.

I. 서 론

CO₂ 레이저에서는 CO₂ 분자의 (00¹)-[10⁰, 02⁰]_I, (00¹)-[10⁰, 02⁰]_{II} 천이대에서 10.4 μm 와 9.4 μm 을 중심으로한 8~12 μm 에 걸친 약 200 개의 진동-회전 천이선(vibration-rotation line)들이 발전한다.⁽¹⁾

충류형 CO₂ 레이저의 총 기체압력은 15 torr 정도로서, 이 압력에서 레이저 선폭에 미치는 주된 기여는 Doppler 확장에서 나온다(50~60 MHz). 천이에 관계되는 양자수 J 에 따라 회전준위들간의 주파수 간격은 52~57 GHz 가 된다. 회전준위들은 회전 감쇄시간(rotational relaxation time)에 의해 특징지어지는 빠른 충돌에 의해서 열적으로 결합한다. 이러한 충돌에 의한 강한 결합으로 인해서 레이저 공진기가 동조되었을 때 회전준위들 사이의 경쟁효과가 생기게 된다.⁽²⁾ 압력 확장 또는 충돌확장의 선폭은 약 5 torr 에서 시작되며 그 크기는 4.7 MHz/torr 이다.^(3,4) 따라서 10 torr 정도에서 발전하는 레이저는 약 100 MHz 의 선폭을 갖게 된다. 회전 천이에서 주파수 선폭은 = 25~30 MHz 이므로, 공진기 길이가 2 m 정도되면, 인접한 중축 모우드

사이의 주파수 간격은 $c/2L=75$ MHz 가 되므로 서로 다른 진동-회전 선들에 대하여 몇개의 중축 모우드가 동시에 발전될 수 있다. 또한, 상위 레이저 준위는 상태 밀도가 Boltzmann 분포에 의하여 주어지는 많은 회전 준위들로부터 만들어지기 때문에, 레이저 천이는 P 및 R 분기에 관계되는 몇 개의 등간격 회전-진동천이로 이루어진다. 그러나 보통 가장 심하게 밀도 반전된 준위에서 일어난다 [$P(22)$ 천이]. 이것은 회전준위의 열중성화율(rotation thermalization rate~ 10^7 sec⁻¹ torr⁻¹)이 발전하는 회전준위의 상태밀도 감소율보다 빠르기 때문이다.⁽⁶⁾ 그러므로 회전준위 전체 상태밀도는 가장 높은 이득을 가지는 회전준위에서 레이저 동작에 기여하게 된다. 보통 발전은 (00¹)-[10⁰, 02⁰]_I (10.6 μm) 천이대에서 몇 개의 발전선 사이에서의 경쟁효과에 의해서 단일 또는 2~3 개의 회전선이 발전하게 된다(사진 1). 9.6 μm 선이나 다른 회전선의 발전을 얻기 위해서는 주파수 선폭 장치가 가장 높은 이득을 가지는 선의 레이저 동작을 억제하기 위하여 공진기내에 설치되어야 한다.

CO₂ 레이저로부터 나오는 다양한 천이선들은 NH₃,

SF₆, HC, CH₃Br, CH₃OH, CH₃F 등과 같은 기체의 흡수 천이대와 가깝기 때문에 이들 분자를 여기시키는 광원으로 쓰여지고 있다.⁽⁶⁾ 따라서 이들 기체를 매질로한 원적외선 레이저의 펌핑용 광원으로 이용할 수 있다. 원적외선 레이저는 분자의 회전운동에 의한 미세준위들의 에너지 차이를 이용하는 것으로서, 이들 분자들을 여기시키기 위한 파장은 2.5~10 μm 정도이며 이 때 발진하는 파장은 36~2000 μm 가 된다.⁽⁷⁾ 메틸알코올 레이저의 경우 CO₂ 레이저의 9P(36), 9P(34), 9P(32), 9R(10)선에서 0.1~10 W 정도의 출력으로 광펌핑을 할 때 5~10 mW 의 비교적 큰 연속출력이 나오게 된다.⁽⁸⁾

본 실험에서는 공진기 길이 240 cm 일 때 발진하는 레이저 발진기의 출력 특성을 조사하였고 반사 회절격자를 사용하여 레이저 발진선의 파장을 가변시켜 10.4 μm 천이대와 9.4 μm 천이대의 P-분기와 R-분기의 각 천이선의 출력분포를 얻었다. 제작된 레이저는 플라즈마 진단을 위한 메틸알코올 레이저의 여기용 광원으로 사용하기 위한 것이다.

II. 장치제작 및 실험

1. 레이저 발진기 제작 및 연속출력 측정

레이저 발진기는 길이 90 cm, 내경 2.2cm 인 파이렉스관 2개를 연결하여 레이저 방전관으로 사용했고 방전관 외벽에는 레이저 작동시 방전 플라즈마로 인한 가열에 따른 출력 및 파장의 변화를 방지하기 위해 내경 3 cm 의 아크릴관으로 물순환 냉각 장치를 제작하였다. 냉각은 수돗물로 하였으며 냉각수 온도는 방전시 약 18°C 정도로 일정하게 유지하였다. 레이저 발진을 위한 반사경으로는 곡률반경 10m, 직경 1.5"의 금이 증착된 구리 전반사경과 곡률반경 10m, 직경 1.5", 투과도 30%인 ZnSe 반투과경을 출력경으로 사용하였다. ZnSe 반투과경은 고온의 기체흐름에 의한 손상 방지와 정렬을 쉽게 하기 위하여 전극으로부터 약 20 cm 의 유리관을 연장하여 스텐으로부터 주름상자와 3개의 마이크로메타헤드를 써서 그림 1과 같이 설치하였다.

레이저 발진관에 전기 방전을 시켜주기 위한 전원으로는 30kVA 용량의 전압 조정기와 출력전압 30 kV, 출력 최대 전류 1A 인 고전압 직류전원을 이용했다. 전원의 연결은 2개의 방전관에 병렬로 연결하여 양측 전극에는 음극을, 중앙 전극은 공통 접지가 되도록 하였다. 이렇게 함으로써 전극 사이의 방전 전압을 낮출 수 있고 안정한 클로우 방전을 이룩할 수 있었다. 각 전극의 방전

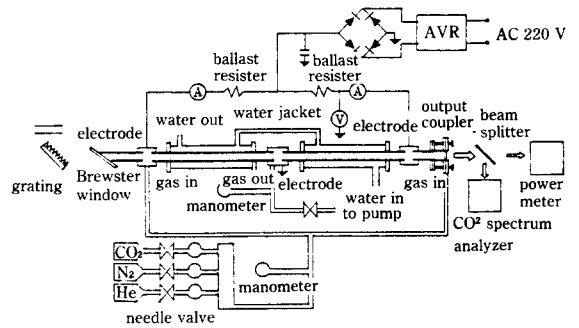


Fig. 1. Schematic diagram of Tunable CO₂ laser system

저항은 60 kΩ 을 연결하였고 필터 커패시터는 1 μF 를 사용하였다. 전극 재질은 SUS 304 로 링형태로 가공하고 외부에 몰라켓을 만들어 전극의 온도상승을 억제했으며 수시간의 레이저 작동으로 물이 끓는 것을 방지하기 위해 냉각팬을 전극 주위에 설치했다.

용적 200 l 의 용기에서 나온 CO₂, N₂, He 기체들은 유량계를 거친 후 혼합되어 레이저 발진관의 양쪽으로 주입하였으며, 압력은 발진기의 입구와 출구에서 수은 manometer 를 설치하여 측정하였다. 유량계는 Matheson Gas Product 사의 Tube No.603 을 사용하였고 진공 펌프의 배기속도는 1200 l/min, 도달압력 10⁻⁴ torr 이다.

연속출력의 특성조사를 위해 기체의 혼합비율, 전체 압력, 방전 전류의 변화에 따른 레이저 출력을 측정하였다. 방전 전류는 30~100 mA 까지 5 mA 씩 변화시켰다. 압력과 기체 혼합비율은 유량계의 니들 밸브로 조절하였고, 전체 압력이 4~14 torr 일 때 흐르는 기체의 유량은 4.6~9.5 l/min, 유속은 28~58 cm/sec 로 계산되었다. 출력경을 통해 나온 빔의 출력은 빔 강도의 1/20 이 통과하도록 제작된 Chopper 를 통과한 빔의 출력을 Power energy meter (Scientech Model No.362) 로 측정하였다.

2. 파장가변 출력의 측정

파장가변 실험은 전반사경 위치에 Brewster 창과 반사 회절격자를 설치하였다. Brewster 창은 66×25×3 mm 의 ZnSe 로서 파장 8~13 μm 에 대한 굴절률이 2.4 이므로 Brewster 각은 67.4° 가 된다. 본 실험에 사용된 회절격자는 Jobin Yvon 사의 ML 302 로서 10.6 μm 파장에 대한 1st order 로 blaze 되어 있고, 단위길이당 groove 수는 100 grooves/mm 이다. 격자 지지대는 3

개의 마이크로메타헤드로 상하평형을 맞추고 하나의 마이크로메타헤드와 스프링으로 좌우회전이 가능하도록 제작하였다. 파장가변 실험은 He-Ne 레이저를 이용하여 회절격자를 Littrow 형으로 설치하여 (Blaze angle=입사각=반사각=32°) 격자 지지대의 마이크로메타헤드를 움직여 격자의 각도를 바꾸어 가며 행했다. 실험에 사용된 회절격자는 격자홈에 대해 수직으로 편광된 빛에 대해 효율이 크므로 Brewster 창을 이 조건에 맞도록 설치하였다.

파장가변된 빔의 출력과 파장은 beam splitter (50/50)를 사용하여 CO₂ 스펙트럼 분석기(Optical Engineering사의 Model 16-A CO₂ Spectrum Analyzer)와 출력계를 사용하여 동시에 측정하였다.

III. 결과 및 논의

1. 연속발전 출력

CO₂ 레이저의 연속출력에 영향을 미치는 주요한 요소로는 CO₂, N₂, He의 분압비, 방전 전류 또는 전기입력, 기체의 유량, 방전관의 온도, 방전 길이, 기타 첨가물 등이 있다. 최대 출력을 얻기 위해서는 이러한 요소들을 적정화해야 한다.⁽⁹⁾

(1) 방전 전류에 따른 출력의 변화

그림 2에 전류에 따른 출력의 변화를 보인다. 전류는 30~100 mA 까지 5 mA 씩 변화시키면서 출력을 측정하였다. 그림에서 전류의 증가에 따른 출력은 증가하다가 방전 전류 50~60 mA 부근에서 최대치를 보이고 서서히 감소함을 알 수 있다. 전류가 증가하면 방전관내의 전자 밀도가 증가하고 결과적으로 상위준위로의 펌핑률이 증가하고, 밀도발전이 커지게 되어 출력은 증가한다. 그러

나 전류밀도를 증가시키에 따라 전기입력이 증가하게 되어 방전관 중앙으로부터 기체의 온도가 상승하기 시작한다. 기체의 온도가 상승하게 되면 상위 레이저 준위에서의 충돌에 의한 감쇄율이 급격히 증가하여 상위준위 밀도의 감소를 가져오게 되고, 상대적으로 하위준위의 열적 밀도가 증가하여 밀도반전이 감소된다. 즉 초기에는 전류 증가에 따라 밀도반전과 이득이 양의 효과로 증가하다가 나중에는 전류 증가에 따른 기체 온도상승의 효과가 지배적으로 되기 때문에 출력의 감소를 보이게 된다.

(2) 압력과 기체 유량에 따른 출력의 변화

그림 3은 압력에 따른 출력의 변화를 보인다. 압력이 증가하면 기체의 유량도 같이 증가하게 되는데, 이는 압력의 변화에 따라 진공 펌프의 속도를 변화시킬 수 없었기 때문이다. 압력은 4 torr에서 2 torr 씩 증가시키면서 18 torr 까지 변화시켜 출력을 측정하였다.

전류가 일정할 때 압력이 증가하면 출력은 증가하다가 약 12~14 torr에서 최대치를 보이고 감소하였다. 전류가 일정할 때 이득에 대한 전체 입력의 영향은 방전관의 직경과 밀접한 관계가 있으며,⁽¹⁰⁾ 압력이 증가하면 CO₂ 분자와 N₂ 분자의 밀도가 증가하기 때문에 출력이 증가한다. 한편, 압력 증가에 따라 진공 사이의 전기장이 강해지고 결과적으로 입력이 증가하게 되어 기체온도의 상승효과를 가져오게 되므로 상위준위의 밀도 감소를 야기시킨다. 증가된 기체압력은 v_g 크기의 충돌 감쇄속도를 증가시키게 되며, 높은 전류에서는 기체온도 변화가 심하게 되어 충돌 감쇄율은 더욱 증가하게 된다.⁽¹¹⁾ 따라서 이득을 최대도 하기 위해서는 압력을 최적화하여야 한다. 압력이 증가함에 따라 glow 방전의 불안정이 생겨 남을 관찰할 수 있었는데 glow 방전의 불안정은 방전 지

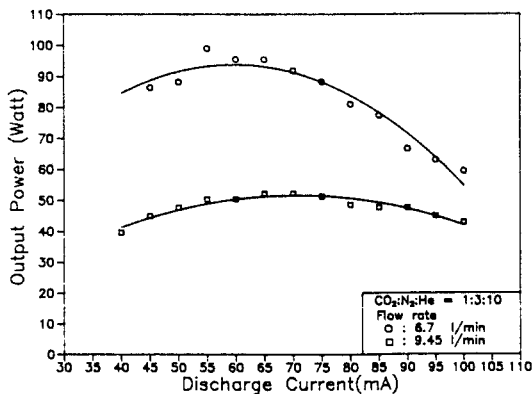


Fig. 2. Output power versus discharge current

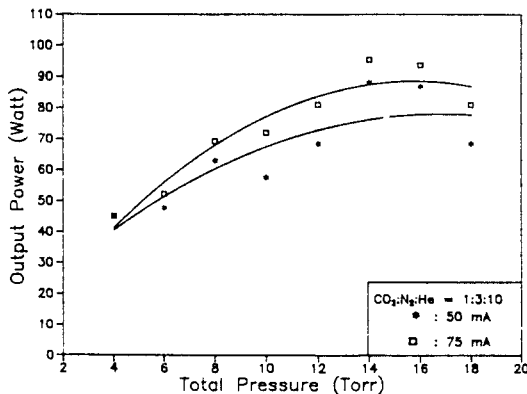


Fig. 3. Output power versus total pressure

항을 40 kΩ에서 60 kΩ으로 변화시킴으로서 높은 압력에서도 안정한 glow 방전을 얻을 수 있었다. 압력이 4 torr에서 14 torr로 변할 때 기체유량은 4.6~9.5 l/min이고 유속은 28~58 cm/sec 정도이므로 기체가 방전관에 머무는 시간은 1.7~1.4 sec로 계산되었다. 축류형 레이저에서는 유속을 빨리 할수록 기체의 냉각을 용이하게 하고 방전시 CO₂ 분자의 해리에 따른 불순물을 줄일 수 있기 때문에 출력은 증가한다. 기체의 흐름속도가 충분히 빨라서 기체가 방전관에서 머무는 시간이 0.1 초 이하가 되지 않으면 CO₂ 분자의 해리효과가 축류형 레이저의 이득을 결정하게 된다.

제작된 레이저는 기체 혼합비 CO₂ : N₂ : He = 1 : 3 : 10, 전류 55 mA, 전체 압력 14 torr에서 최대 100 W의 출력을 얻었다. 이 때 기체의 유량은 9.5 l/min, 유속은 58 cm/sec로서 단위길이당 출력은 55 W/m가 된다.

2. 파장가변 출력

파장가변 실험은 연속출력이 최대로 되는 조건에서, 회절격자를 회전시키면서 행했다. 그림 4와 그림 5에 회전 양자수 J에 따른 출력의 변화를 보인다. 9.4 μm 영역의 R(10)-R(32), P(10)-P(38), 10.4 μm 영역의 R(16)-R(38), P(6)-P(36)의 약 60여개의 발진선들을 분광기로 확인할 수 있었다. 이 때 가변 파장은 9.3295 μm에서 10.7648 μm가 된다. 실험에서 얻어진 출력분포는 CO₂ 레이저의 이득 곡선과 대체로 잘 일치되었다.

회절 양자수 J에 따른 출력이 이득분포곡선과 정확하게 일치하지 않는 이유는 이득곡선은 증폭기를 사용했을 때 입력을 일정하게 하고 출력을 관찰함으로써 얻어지나 본 실험은 레이저 발진기에서 나오는 출력 자체를 측정했기 때문에 출력특성이 이득곡선과 일치할 수 없는 것으로 생각된다. 단일 파장 CO₂ 레이저에서 서로 다른

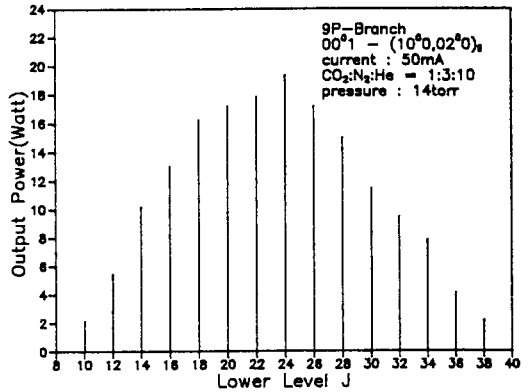
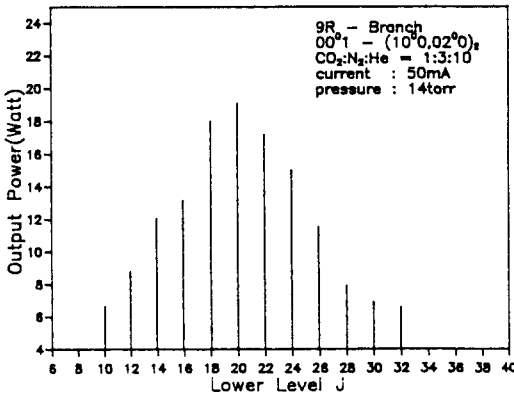


Fig. 4. Output power versus rotational Quantum number (9.2 um Band)

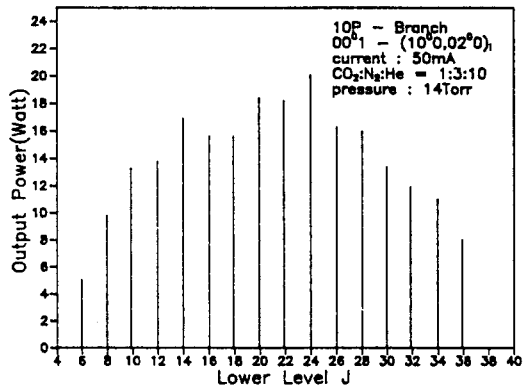
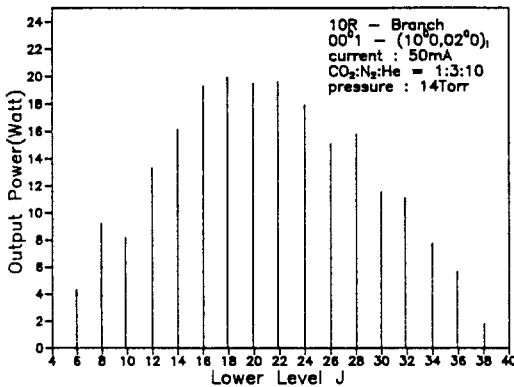
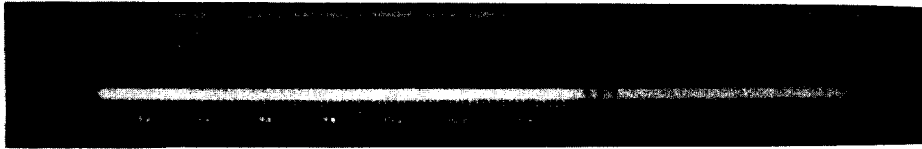


Fig. 5. Output power versus rotational Quantum number (10.4 um Band)

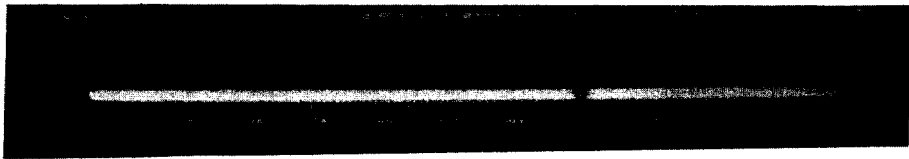
선들에서 발진하는 출력은 회전 준위들 사이의 결합 (rotational coupling)으로 인해 서로 독립적이 되지 못한다. 만일 인접한 두 회전선 사이의 주파수차(2cm⁻¹)가 $c/4L$ 의 정수배가 되면 각 파장에서의 출력이 서로

독립적일 수 있다. (6)

단일 파장으로 발진시 출력의 변화는 매 분당 대략 2~3 Watt 정도로 나타났는데 이는 주위의 진동에 의한 정열의 흐트러짐, 반사 회절격자의 회전시 정열의 깨어

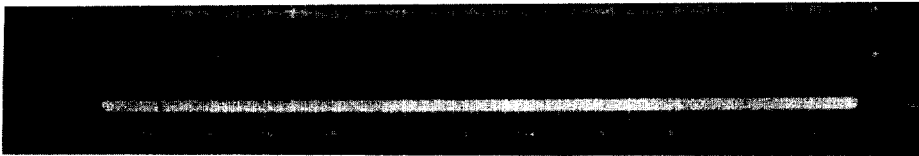


10P (20)
10P (24)
10P (26)

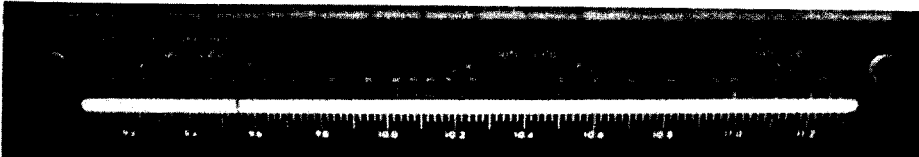


10P (20)
10P (22)

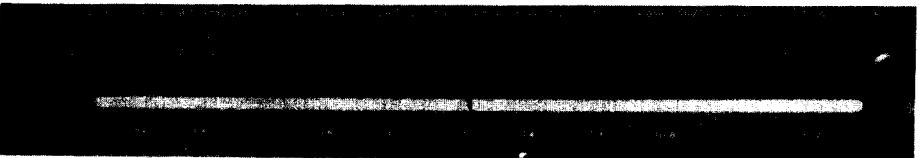
사진 1. 연속발진일 때 발진파장들의 스펙트럼.



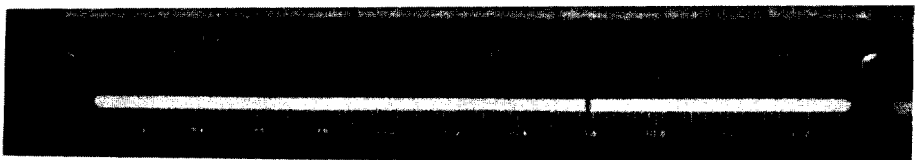
9R (20)



9P (20)



10R (20)



10P (22)

사진 2. 파장가변된 선들의 스펙트럼(10R20).

짐, 레이저 방전관의 열팽창, 공진기내의 압력변화, 출력경의 손상 등에 기인한 것으로 생각된다.

사진 1은 파장가변을 하지 않았을 때 발진하는 파장들이 분광기에 나타난 모습들로서 10.6 μm 주위의 몇 개의 선들이 동시에 발진하는 모습을 보인다. 사진 2는 파장가변을 결과 각 band에서 이득이 큰 선들이 발진하는 모습을 보인다.

메틸알코올을 레이저의 여기용 광원으로 사용하기 위한 CO₂ 레이저의 회전선들과 이 때 필요한 문턱출력, 실험결과 발진된 출력을 표 1에 나타내었다.

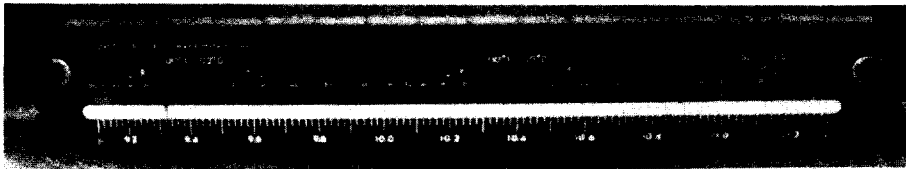
위의 결과로부터 제작된 레이저는 9P(36)선과 9P(32)선을 발진시켜 메틸알코올 레이저 여기용 광원으로 사용할 수 있고, 9P(34)와 9R(10)선은 임계출력에 근접한 값을 얻었으므로 약간의 성능개선을 통해 메틸알코올 레이저 여기광원으로 사용할 수 있을 것이다. 사진 3은 메틸알코올 여기과장들에 대한 분광기의 모습이다.

표 1. 가변파장의 출력과 메틸알코올 레이저의 여기 조건.

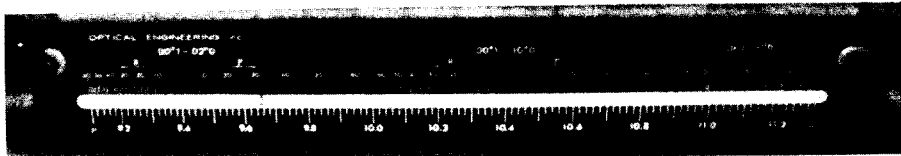
line	threshold value (W)	output power (W)	wavelength (um)
9P (36)	0.2	9	170.57
9P (36)	0.2	9	118.8
9P (34)	10	8	70.51
9P (32)	1	11	42.16
9R (10)	10	9	96.5

IV. 결 론

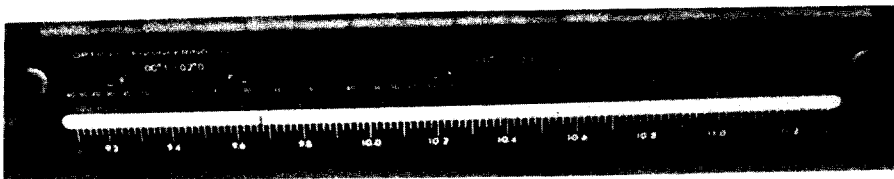
플라즈마 진단용 메틸알코올 레이저의 광펌핑원으로 파장가변형 CO₂ 레이저를 제작하였다. 실험은 연속발진 출력특성을 살펴보고, 가변된 파장에 대하여는 회전 양



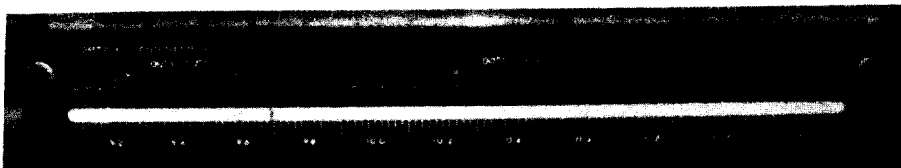
9R(10)



9P(32)



9P(34)



9P(36)

사진 3. 메틸알코올 레이저 여기 파장들의 스펙트럼 (9R36).

자수 J 에 따른 출력변화와 CO₂ 레이저의 이득곡선을 비교하였다.

제작된 레이저의 연속발진을 위한 최적조건은 CO₂ : N₂ : He = 1 : 3 : 10, 전류 55 mA, 압력 14 torr, 기체 유량 9.5 l/min, 유속 58 cm/sec 일 때로서 최대 출력은 100 Watt 였다. 이는 저속축류형 CO₂ 레이저로서 얻을 수 있는 최대 출력인 50~60 watt/meter 에 근접한 값이다.

반사 회절격자를 이용한 파장가변에서는 9.4 μm 영역의 R(10)-R(32), P(10)-P(38), 10 μm 영역의 R(6)-R(38), P(6)-P(36) 등 약 60여개의 회전선들의 발진을 확인할 수 있었고 이 때의 파장은 9.3295 μm 에서 10.7648 μm 까지 변했다. 각 영역에서 얻어진 출력분포는 CO₂ 레이저의 이득곡선과 비교적 잘 일치하였고 파장가변된 출력의 최대치는 20 Watt 정도였다.

파장가변 결과 나타난 CO₂ 레이저의 파장 중 9P(36) 과 9P(32) 선에서 메틸알코올 레이저 여기를 위한 임계치를 넘는 출력이 나왔으므로 이들 파장으로 메틸알코올 레이저를 여기시킴으로써, 170.51 μm 와 42.16 μm 의 원적외선 파장을 발진시킬 수 있다. 9P(34)와 9R(10) 에서도 임계치에 근접한 출력이 나왔는데, 장치를 약간 개선하면 다른 파장으로 발진하는 메틸알코올 레이저 여기광원으로도 사용될 수 있을 것이다.

이는 진공 펌프 등에 의한 진동을 감소시키고 레이저 공진기를 인바봉을 이용하여 고정하는 것이 바람직하고,

회절격자 지지대에서 반사 회절격자를 회전시키는 마이크로 메타헤드의 구동을 stepper-motor 등을 이용한다면 정렬의 흐트러짐을 감소시킬 수 있을 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] C. K. N. Patel, Phys. Rev., Vol. 136, 1187 (1964)
- [2] Hans W. Mocker, IEEE J. Quantum Electron. **QE-4**, 769 (1968)
- [3] A. Yariv, Quantum Electronics (John Wiley & Son, New York, 1975) p. 212
- [4] Anthony J. deMaria, Proceedings of IEEE, Vol. 61, 731 (1973)
- [5] Orazio Svelto, Principles of Lasers (Plenum Press, New York, 1982) pp. 224-225
- [6] Christian Borde and Lucien Henry, IEEE J. Quantum Electron. **QE-4**, 874 (1968)
- [7] T. Y. Chang, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol MTT-22, 983 (1974)
- [8] D. J. E. Knight, NPL Report QU-45 (1982)
- [9] T. G. Roberts, G. J. Hutcheson, J. J. Ehrlich, W. L. Hales, and T. A. Barr, Jr., IEEE J. Quantum Electron. **QE-3**, 605 (1967)
- [10] Thomas F. Deutsch, IEEE J. Quantum Electron. **QE-3**, 151 (1967)
- [11] Klaus. J. Siemsen, John Reid, and Chinch Dang, IEEE J. Quantum Electron. **QE-16**, 668 (1980)

Tunable CO₂ Laser for FIR Laser Pumping

Yun Sik Jin and Kie Hyung Chung

Department of Nuclear engineering, Seoul National University

Heon Ju Lee

Department of Nuclear and Energy Engineering, Cheju National University

(Received: June 26, 1990)

A Continuous wave tunable CO₂ laser which is the slow axial flow type was constructed for the optical pumping of methyl alcohol (CH₃OH) laser. The reflective grating of 100 grooves/mm and 10.6 μm blaze wavelength was used to select wavelength. We have investigated continuous output power characteristics, and then have compared tuned output power profile with the gain curve of CO₂ laser.

The optimum condition for maximum power was found at the gas mixing ratio 1 : 3 : 10 for CO₂, N₂, and He, under this condition the flow rate, pressure of lasing gas and discharge current are 9.5 l/min, 14 torr, and 55 mA respectively. The maximum output power was 55 W/m. Output power of single wavelength operation was measured on 60 individual rotation vibration transitions in the P and R branches of the 10.4 μm band and 9.5 μm band in CO₂. The output power profile obtained from each band is well consistent with the gain curve of CO₂ laser and maximum tuned output power was 20 watt.