

레이저 자기공명분광기용 광대역 CO 레이저의 개발

Development of a Broad-Band CO Laser for the Laser Magnetic Resonance Spectrometer

김 용 평, 최 종 운, 원 종 욱
Y. P. Kim, J. W. Choi and J. W. Won

Laser Laboratory
Korea Standards Research Institute

<Abstract>

The laser magnetic resonance (LMR) which makes use of paramagnetic properties of transient species is a powerful technique for the study of molecular radical ions. A liquid nitrogen cooled cw CO laser is developed for the LMR spectrometer in the mid-infrared region of the spectrum. The laser system is designed to allow broad-band operation from 5 to 8 μm . The design details will be presented.

I 서론

레이저 자기공명 분광법(Laser Magnetic Resonance: LMR)은 1968년 Evenson⁽¹⁾에 의해 개발된 이래, 원자 자유기(free radical) 및 준안정상태의 분자(metastable molecule)등에 대한 강력한 고분해 분광수단으로 폭넓게 이용되고 있다. LMR은 잘 알려진 전자상자성공명(Electron Paramagnetic Resonance:EPR)⁽²⁾과 매우 유사한 분광법으로, 분자나 원자천이 주파수를 고정된 주파수원(frequency source)과 동조시키는데 Zeeman 효과를 이용하는 방법이다. LMR은 지금까지 주로 40-100 μm 사이의 원격외선(far-infrared:FIR) 영역에서 원자 및 분자스펙트럼을 얻은 고감도(high sensitive), 고분해능(high resolution)의 분광법으로 이용되어 왔고⁽³⁾, 따라서 얻어진 정보는 주로 회전천이(pure rotational transition)에 관한 것이었다. 한편, 최근에는 지금까지의 FIR 레이저를 중적외선(mid-infrared:MIR) 레이저로 대체한 새로운 LMR 분광기가 개발되어 분자의 진동-회전천이(vibration rotational transition)에 관한 분광도 가능하게 되었다.⁽⁴⁾ 그러나 지금까지 중적외선 영역에서 LMR 분광기에 이용된 레이저는 CO₂, N₂O, 레이저 뿐으로 그 동작 주파수 범위가 극히 제한되어 있고, 또 그 감도 및 분해능도 FIR 영역에서의 LMR 분광기에 비해 극히 낮은 실정이다.

따라서 한국표준연구소 레이저연구실에서는 중적외선 영역에서 광대역에 고감도, 고분해능을 갖는 LMR 분광기의 개발에 관한 연구를 수행중에 있다. 여기서 채택한 분광기용 레이저는 CO 레이저로, 이는 지금까지 중적외선 영역에서 개발된 레이저중 CO 레이저가 가장 넓은 동작파장(4.9 ~ 8.2 μm) 영역을 갖고, 원리상 고효율동작이 가능하기 때문이다. 본 논문에서는, LMR의 원리에 대하여는 이미 좋은 해설서가 발표되어 있으므로,⁽⁵⁾ 방전여기 CO 레이저의 동작원리, 광대역 동작조건 및 현재 설계 제작중인 레이저 시스템에 대하여만 논한다.

II CO 레이저의 동작원리

1. CO 레이저의 발진원리

그림 1에 CO 분자의 에너지 준위의 일부를, 비교설명을 위하여 CO₂ 분자 및 N₂ 분자의 에너지준위와 함께 나타내었다. CO 레이저의 경우 바닥상태에 있는 CO 분자($\Sigma_g^+ 00^0 0$)는 방전전자와의 충돌, 또는 여기진동준위에 있는 N₂ 분자와의 진동-진동 에너지 전달 과정에 의해 비대칭 신축모드(asymmetrical stretching mode)의 여기상태($00^0 1$)로 여기된다. 레이저동작은 이준위와 대칭 신축모드(symmetrical stretching mode)의 여기준위($10^0 0$) 또는 굴곡모드(bending mode)의 여기준위($02^0 0$) 사이에서 일어난다. Lower level에 있는 CO 분자는 Fermi공명에 의해 ($01^1 0$) 준위에 완화한 다음 진동-회전 완화과정(vibration-rotational relaxation process)에 의해 바닥상태로 완화한다. 이 경우 레이저광으로서 이용가능한

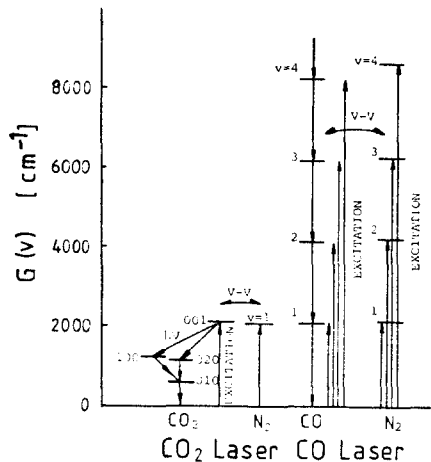


Fig. 1. Vibrational energy level diagram for CO₂, N₂ and CO molecules.

에너지는 upper level의 에너지(2349.16 cm⁻¹)의 일부(960.99 cm⁻¹, 1063.77 cm⁻¹)에 지나지 않고, 나머지는 열에너지로 변한다. 한편 CO 레이저의 경우, 방전전자와의 비탄성충돌 또는 여기진동준위의 N₂ 분자와의 진동-진동 에너지 전달과정에 의해 여기된 CO 분자는 다른 CO 분자와의 진동-진동 에너지 완화과정에 의해 더욱 높은 진동 준위에 여기된다. 레이저 발진으로 광자를

방출하고 일단 낮은 진동 준위에 천이된 CO 분자는 더욱 낮은 진동준위에 cascade 천이를 일으키거나, 방전전자와의 충돌 또는 진동-진동 에너지 완화과정에 의해 다시 보다 높은 진동준위에 여기된다. 따라서 CO 레이저에 있어서 에너지 손실은 진동-병진 에너지 완화과정에 의한 진동에너지의 열화, 즉 gas의 kinetic process에 의한 것으로, CO₂ 레이저와 같이 방진 메카니즘 자체로부터 유래하는 손실과는 성질을 달리한다. 따라서 CO 레이저의 효율은 여기과정, 방전 분포 형성과정, 광에너지 추출과정에 있어서 gas의 kinetic process를 최적화 함으로서 원리적으로 1에 가까운 효율을 얻을 수 있다.

2. CO 레이저의 여기메카니즘

방전여기 방식의 CO 레이저에 있어서 CO 분자의 여기는 전계로 가속된 전자가 CO 분자와 충돌시켜 전자의 운동에너지를 CO 분자의 진동에너지로 직접 변환시키거나, 전자의 운동에너지를 N₂ 중 CO 이외의 분자의 진동에너지로 변환시킨다음 이들 분자와 CO 분자와의 진동-진동 에너지 교환을 일으켜서 이루어진다. CO 나 N₂ 분자는 전자와의 비탄성 충돌에 의한 진동 에너지의 변환에 대단히 큰 여기단면적(excitation cross section)을 갖고 있고, 전자에너지의 약 90% 정도가 진동에너지로 변환된다. 그러나 전자충돌에 의한 직접여기의 충돌단면적은 진동 준위가 높을수록 작아져, CO 나 N₂ 어느쪽도 v = 8 이상의 진동준위에서는 무시할 정도로 작다.⁽⁶⁾ 실제로 CO 레이저에 있어서 레이저 발진을 가능하게 하는 방전분포는 여기된 CO 분자 상호간의 진동-진동 에너지 완화과정에 의해 형성된다. 진동-진동 에너지 완화과정은 진동-병진 에너지 완화과정보다 훨씬 빠른 반응속도를 갖기 때문에 진동준위사이의 밀도분포(population distribution)는 non-Boltzmann 분포를 이룬다. 이러한 현상은 소위 비조화 펌핑 과정(anharmonic pumping process)이라 불리어지는데, 이로인해 CO 분자의 진동준위에는 완전방전분포(total inversion) 보다는 부분방전분포(partial inversion)가 형성된다. 그림 2에 2개의 인접한 진동준위에 있어서 회전준위의 밀도분포를 보인다. 그림에서 두진동준위의

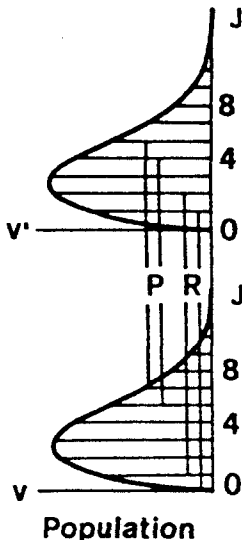


Fig. 2. Partial inversion between two vibrational transitions (V and V') having the same total population.⁽⁷⁾

밀도(population)가 같다할지라도, 방전분포는 2개의 P-branch(J'=5→J=6, J'=4 J=5)와 2개의 R-branch(J'=2 J=1, J'=1 J=0) 사이에 형성된다. 이러한 부분방전분포 상태하에서 레이저 발진은 가능하게 된다. 일단 레이저 발진이 일어나면, 레이저 상준위의 밀도는 줄어들고, 레이저 하준위의 밀도는 높아지는데, 소위 cascading 현상에 의해 밀도가 줄어든 상준위는 그보다 높은 여기준위에 대해 레이저 하준위로 작용하고, 레이저 하준위는 그보다 낮은 진동준위에 대해 레이저 상준위로 작용한다. 이러한 cascading 과정은 대단히 작은 반응 속도의 진동-병진 완화율과 결합하여 대부분의 진동에너지를 레이저 에너지로 추출가능하게 한다. CO 레이저에 있어서 저온 동작의 필요성은 비조화 펌핑 과정에 기인한다. 그림 3에 병진온도(translation temperature)를 변수로 해서 진동에너지준위에 대한 밀도분포의 변화를 보인다.

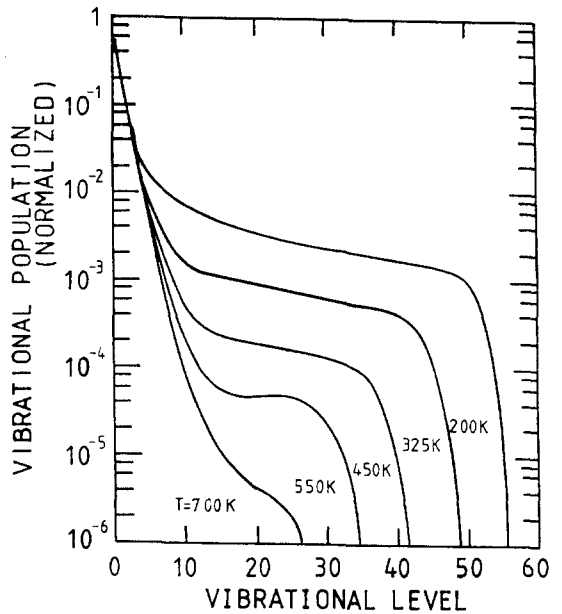


Fig. 3. Calculated vibrational population for values of gas temperature.⁽⁸⁾

그림에서 병진온도(translation temperature)가 낮을수록 높은 진동준위의 밀도는 비약적으로 높아짐을 알 수 있다. 이것은 cascading 과정을 촉진시켜 고효율동작을 가능하게 한다. 한편, 진동-병진 완화율도 저온에서 그 값이 작아짐은 잘 알려진 사실이다.

III 광대역 CO 레이저의 설계

그림 3에 보인바와 같이 CO 레이저에 있어서 높은 진동 준위의 밀도를 크게하기 위해서는 병진온도를 낮추어야 한다. 한편, 중적외선영역에서는 수분에 의한 광자의 흡수가 일어나는데 그 흡수단면적은 파장이 길수록 큰 값을 갖는다. 따라서 광대역에서 동작하는(즉, 장파장 쪽으로 동작파장영역을 확장) 레이저를 위해서는 레이저 매질의 냉각과 공진기자체를 water-free 조건하에 두는게 필요하다.

여기서는 동작파장영역 5 ~ 8 μm를 목표로 레이저 시스템을 설계하였다. 레이저 시스템은 1) 레이저 본체

2) 전원부 3) 냉각 장치로 크게 나눌 수 있는데 그림 4에 그 개략도를 보인다. 시스템을 가능한한 간소화하기 위해 레이저 본체는 하나의 반침대에 설치될 수 있도록 하였으며, 특히 잡음 (진동, 열팽창)에 의한 레이저 출력특성의 변화를 방지하기 위해, 반침대로는 granite bar를 사용하였다. 시스템 전체의 길이는 250 cm 이다. 레이저 방전관은 전체 길이를 120 cm 구경을 $\phi = 15$ mm로 하였으나 실제로 레이저 동작에 기여하는 active length는 110 cm 이다. 전극구성은 그림에 표시한 바와 같이 방전관의 중앙에 공동의 음극을 설치하고 방전관의 양단에 양극을 설치하여 균일한 방전을 얻을 수 있도록 하였다. 전극재료로는 Ni 을 사용하였다. 레이저매질의 냉각에는 액체질소(LN₂) 을 이용하였는데 그림에 보인바와 같이 laser tube에의 gas의 입력부는 LN₂와 직접연접을 크게 하기 위해 laser tube에 나선형으로 감아 주었다. 또한 레이저의 장시간 연속동작에 의한 LN₂의 감소분을 보충하기 위해 자동조절장치를 이용, 항상 일정한 LN₂의 양을 유지하도록 하였다. 레이저공진기는 grating-reflector pair를 이용하여 구성했는데, reflector로는 곡률반경 15m의 오목거울을 사용하였고 grating은 150 g/mm 및 300 g/mm의 Jobin-Yvon 사

제품을 사용하였다. grating은 고분해능을 얻기 위해 초정밀조정(감도:0.001 /knob)이 가능한 mount를 설계 제작하여 그위에 설치하였고, reflector는 레이저출력을 gain profile의 최대치에서 안정화시킬수 있도록 조정하기 위해 PZT 위에 설치하였다. 한편 레이저 공진기자체는 수분에 의한 흡수방지를 위해 진공상자 속에 설치하였다.

V. 결론

본 연구소 레이저연구실에서는 중적외선 영역에서의 레이저 자기공명분광기의 개발에 관한 연구를 수행하고 있다. 여기서는 LMR 분광기용 광대역 CO 레이저에 대하여 간단한 동작원리 및 여기메카니즘에 대하여 알아보고, 현재 설계제작중인 레이저시스템에 대하여 논하였다.

<reference>

- (1) K.M.Evenson, H.P.Brodia, J.S.Wells, R.J.Mahler, M.Mitsuhima, Phys. Rev. Lett. 21, 1038 (1968).
- (2) 조성호, 자기공명방법, 대우학술총서 자연과학 제26권, 민음사, 서울 (1985).
- (3) K.M.Evenson, Faraday Discuss. Chem. Soc. 71, 7 (1981).
- (4) W.Seebass, J.Werner, W.Urban, R.Comben and J.M.Brown, Mol. Phys. 62, 161 (1987).
- (5) K.M.Evenson, R.J.Saykally, D.A.Jennings, R.F.Curl, Jr. and J.M.Brown, Chemical and Biochemical Applications of Lasers, vol.5, Academic press, New York(1980).
- (6) G.J.Schulz, Phys. Rev. 135, 988 (1964).
- (7) O.Svelto, Principles of Lasers, Plenum Press, New York (1982).
- (8) G.E.Caledonia and R.E.Center, J. Chem. Phys. 55, 552 (1971).

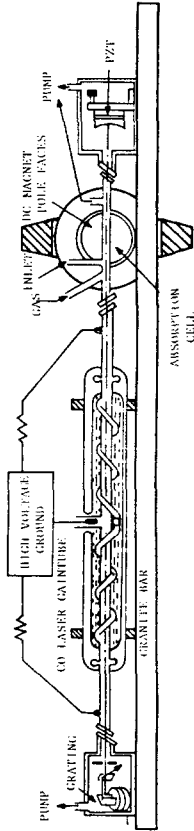


Fig. 4. Side view of the CO laser system.