

Laser Diode에 의한 Mg 원자 선속의 냉각용 Laser 발생 Generation of Resonant Laser for Mg Atomic Beam Cooling by Laser Diode

한양대학교 자연과학대학 물리학과

김 필 수

F. Strumia and N. Beverini

University of Pisa, Pisa, Italy

Mg 원자 선속의 냉각에 쓰일 diode laser의 특성과 이용가능성을 연구하였다. Mg 원자의 $^3P_2 - ^3D_3$ 전이의 공명선 383.8nm를 얻기 위하여 Mitsubishi사의 ML형 laser diode를 택하여 주입전류와 온도를 변화시키고, 회절격자를 써서 767.6nm의 laser광을 얻은 후 $LiIO_3$ 결정에 의해 383.8nm인 제2조화파를 생성하였다. Ring cavity내에서 기본파가 공명할 때 증강계수는 15이었다.

1. 서 론

물질 분석에서 고분해 분광을 실현하려면 Doppler 효과를 제거하고, 흡수물질과 빛과의 상호작용 시간을 증가시키고 동시에 상호작용 부피를 작게 해야 한다. 이것은 흡수 물질입자의 운동에너지를 감소시키는 것으로서 입자를 냉각(cooling)하면 가능하다. 이러한 냉각은 감속하는 이온이나 원자 선속에 laser광선을 쬐이므로서 실현될 수 있다. (1-4)

Laser에 의한 원자선속의 냉각, 즉 감속은 원자선속과 반대의 방향으로 공명 laser광선을 진행시킴으로써 이룰 수 있다. 감속과정 동안 원자 선속내의 입자들은 계속적으로 광자를 흡수하고 자발적으로 재방출을 하게 된다. 매흡수과정에서 laser광선의 진행방향으로 광자의 운동량 h/λ 가 원자에게 전달되지만 재방출은 모든 방향으로 아무렇게나 일어난다. 따라서 매흡수과정마다 $h/m\lambda$ 의 평균감속이 생기게 되며 계속적인 과정으로 원

자는 거의 정지상태에 이를 수 있다. 예로서 기저상태 1S_0 에서 1P_1 상태로 여기된 ^{24}Mg 원자 ($\lambda = 285.2nm$)는 매흡수 - 재방출 과정마다 5.83cm/s의 속도 변화가 일어난다. 따라서 700m/s의 속도를 가진 ^{24}Mg 원자를 파장 285.2nm의 laser광으로 정지 시키려면 약 12000번의 흡수 - 방출과정이 일어나야 한다.

이러한 원자 선속의 냉각은 laser의 발달과 더불어 진동수 표준에 유용하게 쓰이고 있으며 관심의 대상이 되고 있다. 원자 선속의 효과적인 감속이 Na 및 Cs 원자 선속에 대해 이루어진 이래 5) Mg 및 Ca 원자 선속에 대해서도 수행되어 분광학, 특히 시간과 진동수 표준에 이용하기에 이르렀다. (6, 7)

여기서는 Mg 원자 선속의 냉각과 진동수 표준에의 응용에 필요한 laser광원으로 diode laser를 택하여 그 특성을 조사하고 필요한 공명파장을 생성하기 위한 방법을 찾은 다음, ring resonator내에서 출력을 증강시키려는 것이다.

2. Mg 원자의 에너지준위와 공명파장

Mg 원자의 천이는 가시광선 및 원적외선 영역내에서 일어나며 원자 진동수 표준의 유용한 기준으로 쓰일 수 있다. Mg 원자의 가장 낮은 에너지 준위도는 Fig.1과 같다. 이 원자의 공명선은 강한 단일 천이인 $1S_0 - 1P_1$ 으로서 285.2nm 이다. 기저 상태에서 전자운동량은 $J=0$ 이며 자연동위원소는 핵 스핀을 가지지 않는다. 즉 기저 상태에서는 비축퇴이므로 2준위계가 되어 다루기 편리하다. 이와는 달리 Na 나 Cs 원자의 기저상태는 $2S_{1/2}$ 로서 두개의 초미세구조인 부준위를 가지므로 이들 준위로부터 원자를 여기시키려면 어려움이 따른다. 요컨대 Ca 및 Mg의 이용이 손쉽다고 할 수 있다.

Mg 원자의 $1S_0 - 1P_1$ 공명선인 285.2nm는 Rhodamine 6G cw laser의 570nm 선을 진동수 배가 시킴으로써 만들어 낼 수 있다. 그러나 dye laser는 고가이고, 취급이 어려우며 불안정한 단점을 지니고 있다. 이에 비하여 diode laser는 저렴한 가격, 소형경량, 고효율 저전압 작동, 취급간편의 잇점 외에도 직접 전류로 변조할 수 있으며 파장을 변화시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 비록 출력에는 제한이 있고, 원하는 파장의 laser diode를 선택하기가 용이하지 않은 불편이 있지만 한정된 파장범위 내에서 분광학적 응용과 원자선속의 laser 냉각에 유용하게 쓰일 수 있다.

예컨대, Ca 원자의 $1S_0 - 1P_1$ 공명선인 파장 422.6nm는 laser diode에서 방출되는 845.2nm의 방출광을 진동수 배가 시켜서 얻을 수 있다. 그러나 Mg의 경우 $1S_0 - 1P_1$ 의 285.2nm 선은 적합한 laser diode가 없으므로 그 대신 Fig.1에서 볼 수 있듯이 $3P_2 - 3D_3$ 천이의 383.8nm ($3s4p\ 3P_2 - 3s3d\ 3D_3$)의 파장을 선택하면 가능하다. 이 공명선은 Exalite dye laser나 진동수 배가의 Ti-sapphire laser로 얻을 수 있지만 간편하게 laser diode의 방출파장 767.6nm를 진동수 배가하여 얻을 수 있다.

그러나 상온에서 작동하는 파장 767.6nm의 laser diode를 구하기는 매우 어려우므로 이에 가까운 laser

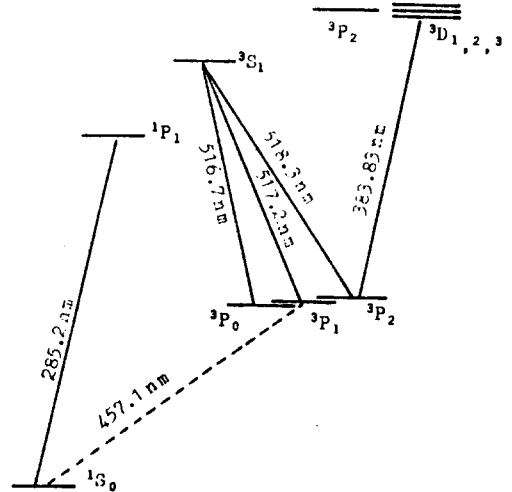


Fig.1. Level scheme of magnesium.

diode를 택하여 주입전류 (injection current), 온도변화, 또는 회절격자 사용 등으로 파장을 선별한 후 진동수를 배가하면 원하는 파장의 laser 광원을 얻을 수 있다.

이 연구에서는 Mg 원자의 $3P_2 - 3D_3$ 의 천이와 767.6nm에 한하여 다루기로 한다.

3. Laser Diode의 특성 실험

(1) Laser diode의 peak파장 선별

Mg 원자 선속의 감속에 이용될 laser 광원은 상온화되어 있는 단일모드 GaAlAs laser diode 중에서 선택하였다. 이들 laser diode에 대해 주입전류와 온도에 따른 방출 peak파장의 변화 및 회절격자에 의한 파장 변화의 가능성을 조사하였다.

Fig.2는 실험장치의 배치도이다. 사용된 광원으로는 Mitsubishi사의 ML 6411A와 ML 67010E 두가지 형의 GaAlAs계 laser diode였다. 이들 laser diode의 방출 peak파장은 상온에서 각각 784nm 및 788nm이므로 적절한 방법으로 방출파장을 조절하여 767.6nm가 되게 한 다음 진동수를 배가 시킴으로써 Mg의 $3P_2 - 3D_3$ 공명선

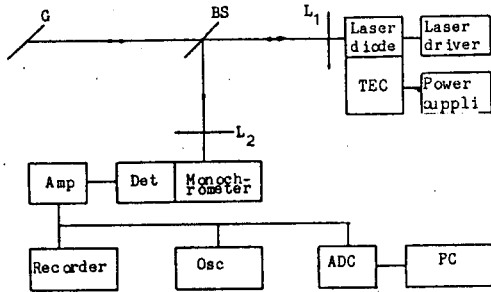


Fig.2. Schematic diagram of the laser diode test.

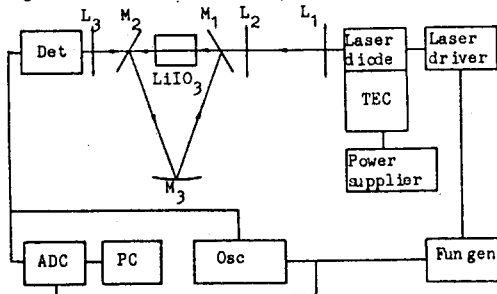


Fig.3. Experimental configuration of power buildup cavity and second harmonic generation.

인 383.8nm의 제2조화파를 만들어 Mg선속의 감속에 쓰려는 것이다. Table 1은 사용된 laser diode의 특성을 나타낸 것이다.

Laser driver에 의해 전원이 공급되고 조절되는 laser diode는 aluminium mount에 정착되고 열전냉각기(thermoelectric cooler), 즉 Peltier 효과에 의해 냉각되며 heat sink에 접촉시키므로써 -25℃까지 내려갈 수 있다. Laser diode로부터 나오는 빛은 발산광이므로 렌즈 L₁에 의해 집중된다. 광분할기 BS에 의해 반사된 빛은 monochromator로 spectrum이 분석되고 chart recorder나 PC에 연결하여 자료를 기록할 수 있다. 한편 BS를 투과한 빛은 회절격자 G(1200 grooves/mm, blaze angle 21° 6')에 의해 feedback 되는데 회절각의 미소변화에 따라 laser diode의 peak 파장을 조절할 수 있다. 뿐만 아니라 laser diode에 주입되는 전류량과 온도에 따라 peak파장이 변하게 된다. 결국 laser diode의 파장은 주입전류와 온도변화 및 회절격자의 사용으로 가변조절 될 수 있다.

Table 1. Characteristics of Mitsubishi ML type diodes in cw at 25℃.

| Parameter | ML 6411A diode | ML 67010E diode | Condition |
|-----------------|----------------|-----------------|---------------------|
| P _o | 10mW | 25mW | cw |
| I _{th} | 39mA | 69mA | cw |
| I _{op} | 58mA | 145mA | cw, P _o |
| λ _{op} | 784nm | 788nm | cw, I _{op} |

P_o : Light output, I_{th} : Threshold current,

I_{op} : Operating current, λ_{op} : Wavelength at I_{op}

(2) Power bulup cavity와 제2조화파발생

Laser diode로부터 방출되는 빛의 세기는 보통 수 mW 내지 수십 mW에 불과하므로 이것을 KNbO₃나 LiIO₃등 제2조화파 발생기(second harmonic generator)를 통과시켜 진동수를 배가시킬 때 변환 효율이 낮아 2차 출력광의 세기는 현저히 감소하게 된다. 이러한 문제를 해결 하려면 먼저 1차광선을 공명증강 시키는 외부 공진기를 만들어야 한다. 그 다음 이 공진기내에 제2조화파 발생결정체를 놓으면 진동수가 배가된 2차광의 출력을 높일 수 있다. (8.9.10)

Fig.3는 이 실험에 쓰인 장치의 구성도이다. Laser diode로부터 방출되는 TEM₀₀ 단색광은 반사율 98.8%의 2색거울(dichroic mirror) M₁과 M₂, 및 99.8%이상의 반사율을 가진 구면경 M₃로 구성된 ring공진기 내에서 공명할때 빛이 증강된다. M₁과 M₂ 사이의 간격은 70mm이고 M₃의 초점은 230mm이다. 그러므로 M₁과 M₂의 중간에 beam waist가 있게 되고 이곳에 품질좋은 KNbO₃나 LiIO₃ 등의 결정체를 정렬하여 제2조화파가 발생되도록 방향을 설정하면 된다. 공진기 내에서 KNbO₃나 LiIO₃결정을 투과할때 발생된 진동수 배가의 제2조화파는 2색

거울 M₂를 부과하여 방출되지만 변환되지 않은 1차광은 계속하여 ring cavity내를 진행하며 변환 되므로 출력이 증강된다. 방출된 제 2조화파는 분석되거나 원자선 속의 냉각에 이용된다.

4. 결과 및 논의

(1) 주입전류 - peak파장 관계

Laser diode에서 방출되는 peak파장이 주입전류의 변화에 따라 어떻게 달라지는가를 알아 보았다. Fig.2의 배치에서 회절격자 G를 제거하고 laser diode (Mitsubishi ML 67010E)를 일정한 온도 17°C로 유지한 후 주입전류를 변환시키며 peak파장을 측정 한 결과는 Fig.4와 같다. 이 그림에서 보는 바와 같이 전류의 증가에 따라 계단적으로 peak파장이 증가하는 mode hop의 현상을 보여준다. 이 측정은 하한 전류 이하에서는 사실상 peak파장을 얻을 수 없으며 최저 783nm에도 미달한다. 따라서 Mg원자의 $^3P_2 - ^3D_3$ 전이파장 383.8nm의 2배인 767.6nm의 광선을 얻기는 어려웠다. Laser diode의 주입전류로 방출파장을 조절하는 폭은 좁은 편이라고 할 수 있다.

(2) 온도 - peak파장관계

위의 실험과 같은 장치의 구성이지만 주입전류를 고정하고 Mitsubishi ML 6411A laser diode에 온도를 변화시키면서 방출 peak파장을 측정하였을 때 Fig.5와 같은 결과를 얻었다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 온도가 증가함에 따라 peak파장이 일차적으로 증가한다. Laser diode의 온도 -20°C에서는 774nm이며 -25°C가 되면 773nm로 낮출 수 있음을 알 수 있다. 그러나 역시 767.6nm까지는 이르지 못한다.

(3) 회절격자에 의한 파장선별

Fig.2과 같은 배치에서 회절격자 G에서 feedback

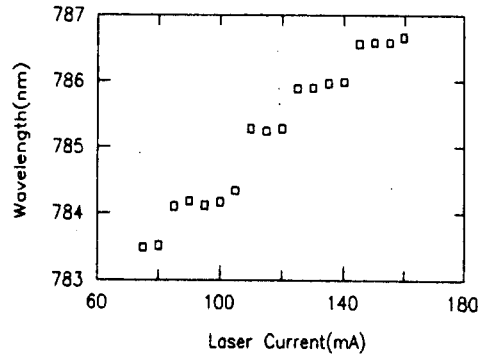


Fig.4. Laser power dependence of peak wavelength at 17°C for Mitsubishi ML 67010E laser diode. The mode hop is clearly seen.

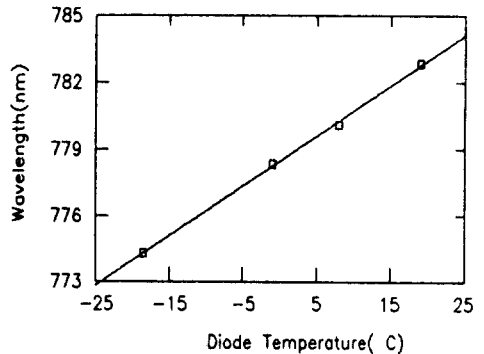


Fig.5. Peak wavelength vs. temperature of Mitsubishi ML 6411A laser diode with operating current 50mA.

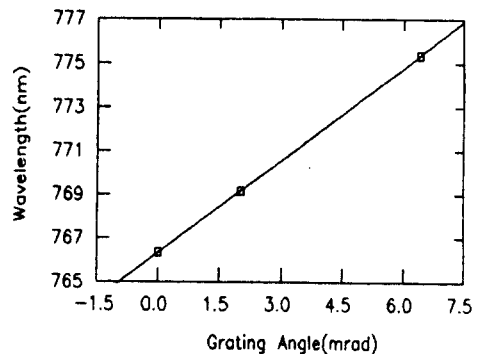


Fig.6. Peak wavelength variation vs. feedback angle of grating for ML 6411A laser diode at -23°C.

되는 빛으로 laser의 peak 파장을 조절할 수도 있다. Mitsubishi ML 6411A laser diode의 주입전류를 50mA로, 그리고 온도를 -23°C 로 일정하게 유지하고 회절격자의 각도를 미소하게 변화시키며 방출 peak파장을 측정한 결과는 Fig.6과 같다. 조절이 가능한 각도 범위는 7mrad에 불과하지만 파장조절 범위는 10nm정도로 비교적 넓어 효율적임을 알 수 있다. 이 그림에서 보는 바와 같이 온도를 -23°C 로 고정하고 회절격자를 사용함으로써 Mg 원자의 $3P_2 - 3D_3$ 공명파장의 2배인 767.6nm의 파장을 쉽게 얻을 수 있다. 이 파장의 빛을 LiIO_3 나 KNbO_3 결정체에 투과시키므로써 제 2조화파인 383.8nm를 얻을 수 있다.

(4) Ring cavity내의 빛의 증강 및 제 2조화파 발생

Laser광을 증강시키기 위하여 Fig.3와 같이 거울 M_1 , M_2 및 M_3 로 구성된 ring cavity에 출력 25mW의 ML 67010E laser diode에서 방출되는 빛을 입사 시켰다. 거울 M_3 를 제거했을 때 반사율 98.8%의 M_1 과 M_2 두 거울만을 부과한 laser광의 세기는 $3.6 \times 10^{-3}\text{mW}$ 로 감소하였다. 이것은 거울 하나의 투과율이 0.012%를 보여 준다. 그러나 M_1 , M_2 및 M_3 로 구성된 ring cavity내에서 공명이 일어날 때 M_3 를 부과하여 방출된 빛의 세기는 45mW로 관측 되어 ring cavity내의 증강된 빛은 675mA로 계산되므로 증강 계수는 15가 된다. 이 값은 다른 연구자들이 12) 측정한 값보다 낮은 편인데, ring cavity를 구성하는 세 거울의 배치와 수차 때문인 것으로 생각된다. Ring cavity내의 LiIO_3 에 의한 제 2조화파의 방출강도는 0.27mW로서 낮은데 그 이유는 LiIO_3 에 적외선 방지 방막이 되어있지 않았기 때문이었다. Ring cavity의 재구성과 박막처리된 품질 좋은 결정체의 사용이 요구되었다.

Fig.7는 ML 67010E laser diode에 ramp current를 가했을 때 ring공진기를 통해 나온 laser광의 spectrum이다. 그림에서 자유스펙트럼 영역은 $\text{FRS} = 650 \text{ MHz}$, 선포폭 $\Delta\nu = 100\text{MHz}$ 이다.

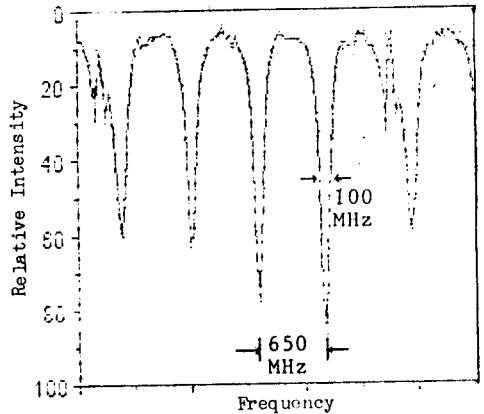


Fig.7. Emission spectrum of Mitsubishi ML 67010E laser diode at single mode operation with the ring cavity ($\text{FRS}=650\text{MHz}$ and $\Delta\nu=100\text{MHz}$).

5. 결 론

Mg 원자 선속의 냉각에 쓰인 광원으로 diode laser를 택하여 그 이용 가능성을 연구하였다. 이 원자의 $3P_2 - 3D_3$ 공명선인 383.8nm의 laser diode 광원을 얻기 위하여 Mitsubishi사의 ML형 laser diode에 대해 기초적인 조사를 수행하였다. Laser diode에서 전류 - 파장 관계는 수 μm 의 파장 범위 내에서 조절될 수 있음을 보여 주었고, 온도 - 파장 관계는 이 보다 더 넓은 조절 가능성을 나타내었다. 그러므로 전류와 온도에 의한 파장 조절에 부가하여 회절격자를 사용하면 파장 선별이 훨씬 쉬워지므로 상온에서 780nm부근의 방출파장을 가지는 laser diode의 경우 767.6nm이하까지 파장이 조절되고 LiIO_3 결정에 의해 제2조화파인 383.8nm의 laser광을 얻을 수 있었다. 또 ring cavity를 이용함으로써 빛의 세기를 증강하고 적외선 반사방지막의 결정을 쓴다면 mW수준의 제2조화파를 방출케 할 수 있을 것이다. 좀더 강한 조화파를 얻으려면 ring cavity의 재구성과 우수한 제2조화파 발생용 결정체 및 고출력의 laser diode가 요구된다. 원자 선속의 냉각과 진동수 표준에 대해 이러한 laser diode의 특성 연구와 활용이 기대된다.

6. 참고 문헌

- 1) T.W.Hansch, A.L.Schawlow, *Opt.Comm.*, 13, 68 (1975)
- 2) W.Neuhauser, M.Holenstatt, P.E.Toschek, H.Dehmelt, *Phys.Rev.Lett.*, 41, 233(1978)
- 3) D.J.Wineland, R.E.Drullinger, F.L.Walls, *Phys. Rev.Lett.*, 40, 1630(1978)
- 4) S.V.Andreev, V.I.Valykin, V.L.Letkhov, V.G.Mingogin, *Pis'ma Zh.Eksp. Theor.Fiz.*, 34, 463(1981)
- 5) W.D.Phillips, J.V.Prodan, H.J.Metcalf, A.Migdall, I.So, J.Dalibard, *Phys.Rev.Lett.*, 54, 992 (1985)
- 6) N.Beverini, S.de Pascalis, E.Maccioni, D.Pereira, F.Strumia, G.Vissani, Y.Z.Wang, C.Nevero, *Optics Lett.*, 14, 350(1989)
- 7) N.Beverini, F.Giammanco, E.Maccioni, F.Strumia, G.Vissani, *JOSA B*, 6, 2188(1989)
- 8) J.C.Baumert, J.Hoffnagle, P.Gunter, *Proc.Soc. Photo-Opt.Instrum.Eng.*, 492, 374(1984)
- 9) M.K.Chun, L.Goldberg, J.F.Weller, *Appl.Phys. Lett.*, 53, 1170(1988)
- 10) G.Dixon, C.E.Tanner, C.E.Wieman, *Optics Lett.*, 53, 1170(1989)
- 11) G.J.Dixon, C.E.Tanner, C.E.Wieman, *Optics Lett.*, 14, 731(1989)
- 12) A.Hemmerich, D.H.McIntyre, C.Zimmermann, T.W.Hansch, *Optics Lett.*, 15, 372(1990).