

# Laser cooling 용 다이오드 레이저의 안정화

이 호 성, 양 성 훈

한국표준과학연구원, 전자기 연구부

대전시 유성구 도룡동 1 번지

세슘원자에 대한 레이저 쿨링용 광원으로 사용하기 위해 다이오드 레이저의 선폭을 축소하고 발전 주파수 및 출력을 동시에 안정화 시키는 연구를 수행하였다. 자유발전 상태에서 선폭이 약 30 MHz 이고, 출력이 10 mW 인 다이오드 레이저에 유리창으로 Q 값이 낮은 외부 공진기를 구성함으로써 발전 선폭을 약 5 MHz 로 줄일 수 있었다. 그리고 세슘원자의 포화흡수 스펙트럼의 교차공진 흡수선에 레이저 주파수를 안정화시키기 위해 주입전류를 10 kHz 로 변조하고, lock-in amp 의 출력단에서 나오는 주파수 오차신호를 전류공급장치와 유리창이 부착된 PZT 로 동시에 피드백시켰다. 또한 오차신호를 레이저 다이오드의 온도 조절장치로 피드백 시킴으로써 주파수와 동시에 레이저 출력을 안정화시킬 수 있었다. 이 때의 출력의 변동폭은 약 0.03% 로서 온도로 피드백 시키지 않는 경우에 비해 약 260배 안정된 결과를 얻었다. 그리고 컴퓨터를 이용해서 흡수선의 peak 값을 매 10 초마다 검색하고 이 값이 최대가 되도록 PZT 전압을 조절함으로써 레이저 주파수를 세슘원자의 흡수선의 봉우리에 1 주일 이상 안정화시킬 수 있었다. 주파수 안정도 측정을 위해 Zeeman 이동된 포화흡수 스펙트르미터를 구성하였으며, 측정된 주파수 안정도 (Allan 분산의 제곱근)는 적분시간 1 초 일때  $1.2 \times 10^{-10}$  이었다.

## I. 서 론

다이오드 레이저는 다른 레이저들에 비해 상대적으로 가격이 싸고, 크기가 작으며, 제작 기술의 발달로 인한 성능 향상으로 그 응용 범위가 점점 넓어지고 있다. 최근에 실온에서 단일 모드로 발전하면서 1 W 의 출력을 갖는 다이오드 레이저가 상용화되었고, 특정 파장에서 안정되게 발전하는 DBR (Distributed Bragg Reflector) 레이저가 개발되는 등, 종래에 색소 레이저나 Ti:Sapphire 레이저로만 가능하던 고분해 분광학 분야<sup>[1,2]</sup>에서 뿐만 아니라 이광자 분광학<sup>[3]</sup>이나 제2 조화파 발생<sup>[4]</sup>과 같이 고출력이 필요한 분야에서도 사용할 수 있게 되었다. 특히, 근래에 국내외에서 활발하게 연구되고 있는 루비듐원자나 세슘원자에 대한 레이저 쿨링 연구<sup>[5,6]</sup>에서 cooling 및 repumping 용 광원으로 널리 사용되고 있고, 세슘원자시계의 광원<sup>[7]</sup>으로 활용되고 있다.

그러나 다이오드 레이저를 이러한 분야에서 사용하기 위해서는 선폭축소, 주파수 안정화, 출력 안정화가 선행되어야 한다. 선폭축소를 위해서는 Fabry-Perot 공진기<sup>[8]</sup>나 회절격자 (grating)<sup>[9]</sup> 를 외부 공진기로 사용하여 공진된 광을 다이오드 레이저로 피드백 시키는 방법이 주로 사용되고 있다. 주파수 안정화를 위해서는 먼저 다이오드 레이저의 온도<sup>[10]</sup>와 주입 전류를

안정화시켜야 하고, Fabry-Perot 공진기의 투과 곡선<sup>[11]</sup>이나 원자의 흡수스펙트럼<sup>[8,12]</sup>과 같은 주파수 분별 장치와 이것으로부터 주파수 오차신호를 찾아내는 lock-in amplifier 등이 필요하다.

본 연구에서는 자유발전 상태에서 선폭이 약 30 MHz 이고 출력이 10 mW 이며, 852 nm 에서 발전하는 다이오드 레이저를 유리창 (bare glass) 만으로 외부 공진기를 형성하여 선폭을 약 5 MHz 로 줄였다. 그리고 세슘원자의 포화흡수 스펙트럼의 교차공진선에 이 레이저의 발전 주파수를 안정화 시켰으며 동시에 출력도 안정화 시켰는데, 본 논문에서는 그 방법 및 결과에 대해서 서술한다.

## II. 실험 장치

### 2-1. 광학계

그림1은 본 실험에 사용된 다이오드 레이저와 광학계의 장치 구성도이다. 다이오드 레이저는 TED (Thermo-Electric Device) 를 사용하여 약 10 mK 이 내에서 온도 안정화를 시켰다.

그림에서 다이오드 레이저 (LD) 출력의 일부를 반사경을 이용하여 PZT 가 부착된 유리창으로 보내고, 이 창에서 반사된 빛은 다시 LD 로 돌아가서 외부

공진기를 형성한다. 외부 공진기가 형성된 상황에서는 PZT 에 삼각파형의 전압을 가하여 유리창의 위치를 변조시키면 레이저 주파수를 연속 변화 시킬 수 있다.

유리창을 통과한 레이저빔을 이용하여 세슘원자셀 (Cs cell)에서 포화흡수 스펙트럼을 관측하였다.<sup>[13]</sup> 여기서 BS1 은 두께 7 mm 의 유리창이고, BS2 는 50:50의 광속분할기이다.

LD 에서 나온 레이저는 optical isolator (OI) 를 거쳐서 주파수 안정도 측정을 위해 준비된 포화흡수 스펙트로미터로 입사한다. 이 스펙트로미터는 세슘원자의 흡수선의 기울기를 이용하여 레이저 발진 주파수의 변화를 측정하는 장치로서, 포화흡수 스펙트럼을 Zeeman 이동시키기 위해서 Cs cell 을 솔레노이드 코일 속에 설치하였고, 두 개의  $\lambda/4$  판을 이용하여 펄핑광과 조사광의 편광을 각각  $\sigma^+$  와  $\sigma^-$  의 원편광이 되도록 하였다. 왜냐하면, 이 편광조합에서 Zeeman 이동된 포화흡수 스펙트럼의 기울기와 신호크기가 주파수안정도 측정에 적합하였기 때문이다.

광학계가 외부 진동이나 음파에 의해 흔들리는 것을 막기 위해서 모든 광학부품들은 중심 높이를 2 cm 로 하였고, 접착제로 바닥에 고정시켰으며, 아크릴로 만든 두껍을 덮어 공기의 흐름을 막았다.

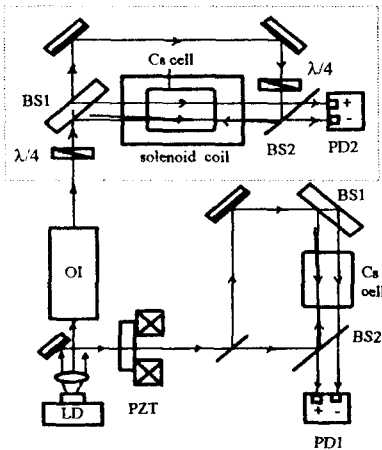


그림 1. 다이오드 레이저의 선폭축소, 주파수 및 출력 안정화 실험 장치도와 주파수 안정도 측정 장치 (점선 상자속).

## 2-2. 주파수 및 출력 안정화 회로

레이저 주파수 및 출력 안정화를 위해 그림2와 같은 안정화 회로를 구성하였다. 그림에서 LD 에서 PZT 를 지나서 PD1 (Photo-Diode)으로 진행하는 선은 레이저빔을 나타내고, 나머지 선들은 전기적인 신호를 나타낸다. 안정화 회로를 동작시키기 위해 그림 1에서 주입전류와 유리창이 붙은 PZT 를 동시에 변조시켜서 레이저 주파수를 sweep 하였다. 주파수 sweep 에 의해 포화흡수 스펙트럼이 가장 넓은 영역에 걸쳐서 깨끗하게 보이도록 이 둘의 sweep 폭과 위상을 조절하였다. 이렇게 함으로써 주입전류와 PZT 로 주파수 오차신호가 피드백될 때 상호 보완적으로 주파수를 안정화 시키게 된다.

포화흡수신호의 봉우리에 레이저 주파수를 안정화 하기 위해 다이오드 레이저의 주입전류를 10 kHz 로 변조하였고, 다음과 같은 네가지의 피드백 회로를 구성하였다.

첫 번째로, 10 kHz 부근의 단기 (short-term) 안정화를 위해 lock-in amplifier에서 검출된 주파수 오차신호를 전류 공급장치로 피드백 시켰다. 두 번째로, 동일한 오차신호를 PZT로 피드백시켰는데, PZT의 반응속도의 제한에 의해 자동적으로 약 1 kHz 부근에서 중기 (mid-term) 안정화가 이루어지도록 하였다.

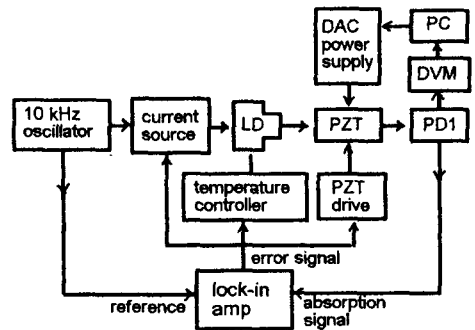


그림 2. 주파수 안정화 회로도; 단, LD에서 PZT를 거쳐 PD1으로 가는 선은 레이저 빔이고, 그외는 모두 전기적인 신호임.

세번째로, 이 오차신호를 온도 조절회로로 피드백 시켜서 다이오드 레이저의 온도 조절에 의해 주파수가 안정화되도록 하였다. 외부 온도 등의 변화로 인해 레이저 주파수가 한쪽으로만 표류하는 경우에는 전류로 피드백 되는 양도 한쪽으로만 커지게 되고, 이에 따라 레이저 출력이 달라지게 된다. 그래서 온도를 조절함으로써 전류와 PZT 에 너무 큰 직류 (dc) 성분의 오차신호가 걸리는 것을 방지하였고 이렇게 함으로써 주파수의 장기 (long-term) 안정화 뿐만 아니라 출력에서도 안정화 효과를 얻을 수 있었다.

그림 3은 다이오드 레이저의 온도 안정화 회로의 개략도를 나타낸 것으로, 온도 지정단자에 더하기 회로 (add amp)를 만들어 주파수 오차신호에 의해 지정 온도가 달라지게 함으로써 온도 조절이 되도록 하였다.

마지막으로, 하루 이상의 장기 안정화를 위해서 컴퓨터와 DAC (Digital-to-Analog Converter : model HP 59501B), DVM (model Fluke 8842A) 를 사용하여 유리창이 붙은 PZT 로 피드백 시키는 특별한 안정화 회로를 구성하였다. 다시 말하면, 외부온도나 레이저 출력이 변하면 흡수신호의 크기가 변하고, 이에 따라 오차신호의 크기도 바뀌어 안정화 조건이 달라지게 된다. 흡수신호의 크기가 변하더라도 그 봉우리에 레이저 주파수가 안정화 되도록 하기 위해서 매 10 초마다 흡수신호의 변화를 관측하여 그 값이 항상 최대가 되도록 PZT에 가하는 전압을 조절하였다.

그림 4는 흡수신호가 항상 최대신호를 찾아 가도록 하는 컴퓨터 프로그램 유통도이다. 이를 간단히 설명하면 다음과 같다.

먼저, 다른 안정화 회로에 의해 이미 주파수 안정화 된 흡수신호값 (Si)을 읽는다. 임의의 방향 (Sign0)으로 PZT에 전압(V)을 가하여 외부 공진기 길이를 변화시킬 때, 변한 흡수신호값 (S)을 읽고, 그 두 값의 차이가 0.1%를 기준으로 증가했는지, 감소했는지, 또는 그대로인지를 판단한 후, 이에 따라 PZT에 가하는

전압의 부호 (Sign1) 를 결정한다. 다시 말해서, 처음에 가한 전압 (V) 과 같은 방향 (Sign0) 으로 가할 것인지, 아니면 반대 방향으로 가할 것인지를 결정한다. 이 한 주기에 걸리는 시간은 10 초이다. 그런데 외부 온도가 표류하여 흡수신호크기가 계속 바뀌는 경우에도 이 변화를 쫓아가면서 안정화 되도록 하기 위해서 기준이 되는 초기 신호값 (Si)을 50초마다 다시 설정해 주었다.

LD 에서 PZT 까지의 거리는 약 5 cm 이고, PZT 의 길이 변화율은 6  $\mu\text{m}/500\text{ V}$  이며, -50 V 에서 +50 V 범위 내에서 전압을 가하였다.

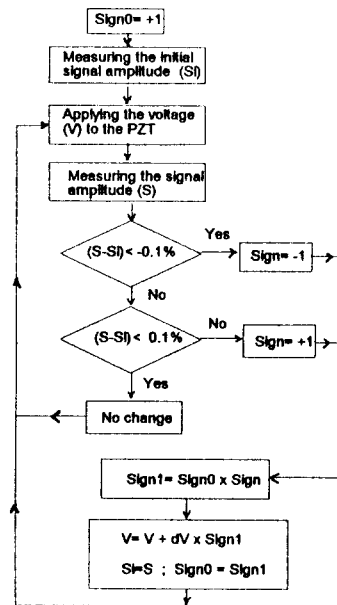


그림 4. 최대 흡수신호를 찾기 위한 프로그램의 유통도.

### III. 실험결과 및 토론

그림 5의 (a) 와 (b)는 각각 그림 1의 실험 장치도에서 레이저 주파수를 sweep 할 때 PD1 과 PD2에서 관측되는 포화흡수 스펙트럼이다. 이 스펙트럼은 세슘 원자의 D<sub>2</sub> 전이 (6S<sub>1/2</sub>-6P<sub>3/2</sub>)에 해당하는 것으로, L1, L2, L3 는 각각 F=4 에서 F'=3, 4, 5 로 전이하는 주공진 흡수선들이고, X1, X2, X3 는 주공진 흡수선들 사이에서 발생하는 교차공진 흡수선들이다. L2 와 이웃한 X2 는 25 MHz 떨어져 있는데, 유리창으로 외부

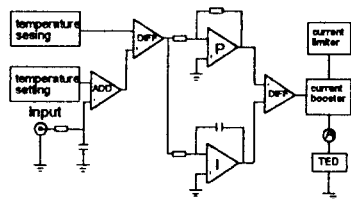


그림 3. 온도 안정화 회로의 개략도.

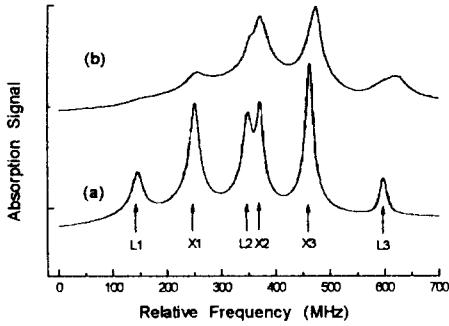


그림 5. 그림 1의 PD1에 관측한 세슘원자의 포화흡수 스펙트럼 (a)과 PD2에서 관측한 Zeeman 이동된 포화흡수 스펙트럼(b).

공진기를 구성하지 않으면 구분할 수 없었다.

레이저 주파수를 X3의 봉우리에 안정화시켰는데, 그 안정도를 측정하기 위하여 X3가 Zeeman 이동된 흡수선의 기울기에 오도록 장치를 가하였다. 안정화된 레이저 주파수가 흔들리면 그림5(b)의 기울기에서는 신호크기의 변화로 나타난다. 따라서 신호크기의 변화 대한 주파수 변화의 비율 [MHz/V]로부터 주파수 변동폭을 알 수 있다.

측정된 주파수 변동으로부터 적분시간 (sampling time)에 대한 Allan 분산의 제곱근을 계산한 것이 그림 6이다. 적분시간이  $10^{-2}$  초에서 1 초사이에서는  $1.4 \times 10^{-9}$ 에서  $1.2 \times 10^{-10}$ 으로  $\tau^{-1/2}$ 에 비례하여 주파수 안정도가 좋아지는 것을 알 수 있는데, 이것은 주파수 안정화된 발진기에서 볼 수 있는 전형적인 특성이다.

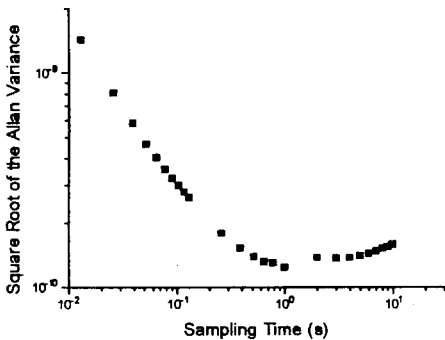


그림 6. 주파수 안정화된 다이오드 레이저의 주파수 안정도.

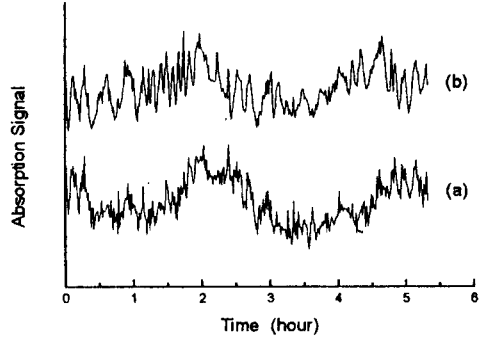


그림 7. 포화흡수선의 봉우리에서 측정된 신호 (a)와 Zeeman 이동된 흡수선의 기울기에서 측정된 신호 (b).

그러나 1 초 이상에서는 점차 나빠지고 있는데, 이것은 주파수 안정도 측정시스템의 특성에 기인하는 것으로, 실제로는 나빠지는 것이 아니다. 다시 말해서, 레이저 출력이 변하거나, 주변 온도가 바뀌어 Cs cell 내의 증기압력이 바뀌어도 포화흡수 신호의 크기가 변하는데, 본 측정 시스템에서는 이것과 실제 주파수 변동을 구분하지 못하기 때문이다.

그림 7은 이 사실을 보여주는 것으로, 그림 7(a)는 흡수선 봉우리에서의 신호크기의 변동을 나타내고 그림 7(b)는 Zeeman 이동된 기울기에서 측정된 주파수 변동이다. 이 둘이 같은 주기로 바뀐다는 것은 레이저 주파수가 아니라 Cs cell을 통과한 흡수신호의 크기가 달라진다는 것을 의미한다.

한편, lock-in amplifier에서 나오는 주파수 오차신호를 온도조절 장치로 피드백 시키지 않을 때와 시킬 때의 레이저 출력을 관측한 결과가 각각 그림 8(a)와 (b)이다. 그림 8(b)의 경우, 출력의 요동폭은 약 0.03%로서 그림8(a)와 비교하면 약 260배 줄어든 결과이다.

레이저 출력의 안정화로 인해 주파수 안정화가 어떤 영향을 받는지 확인하기 위해 출력 안정화를 시켰을 때와 시키지 않았을 때의 결과를 비교하여 보았다. 그림 9는 그 결과로서, 십자로 표시된 점들은 출력 안정화를 하지 않은 경우이고, 동그라미로 나타난 점들은 출력 안정화가 되었을 때이다. 그림에서 보는 바와 같이 출력 변동폭에는 큰 차이가 있지만 주파수 변동폭에서는 출력 안정화에 무관하다는 것을 알 수 있다. 다시 말하면, 본 실험에서처럼 온도를 조절하면 주파수 안정화와 동시에 출력도 안정화된다는 것을 알 수 있다.

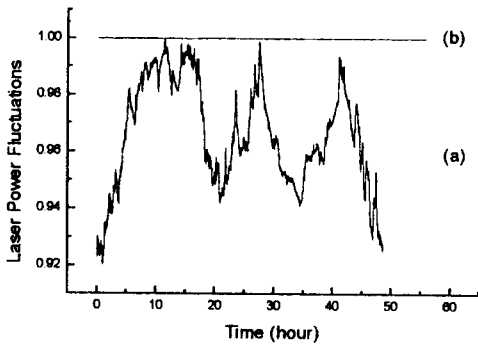


그림 8. 그림 2의 안정화 회로에서 주파수 오차신호가 온도 조절 장치로 피드백 되지 않았을 때 (a)와 되었을 때 (b)의 레이저 출력 변화.

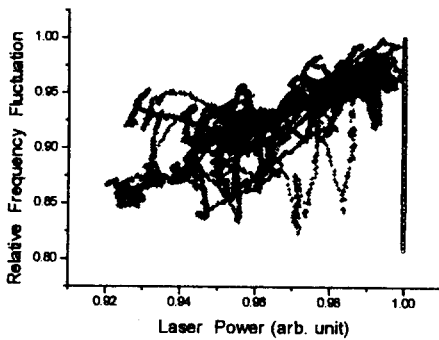


그림 9. 주파수만 안정화 되었을 때 ( x로 표시된 점들)와 주파수와 동시에 출력이 안정화 되었을 때 (o 으로 표시된 점들)의 상대적인 주파수 요동 범위; 이들은 각각 그림 8(a)와 (b)에 해당함.

#### IV. 결론

세슘원자에 대한 레이저 쿨링용 광원으로 사용하기 위해 자유 발진 상태에서 선폭이 30 MHz 인 다이오드 레이저를 유리창을 사용하여 전체 레이저 출력의 약 0.5% 를 피드백 시키는 외부 공진기를 구성하여 선폭을 세슘원자의 자연선폭 수준인 5 MHz 로 축소시켰다.

세슘원자의 포화흡수신호에 주파수를 안정화 시키기 위해 네가지의 피드백 회로를 구성하였다. 즉, 10

kHz 로 주입전류를 변조시켰을 때 lock-in amplifier 에서 나오는 주파수 오차신호를 전류 공급장치와 유리창이 붙은 PZT 로 피드백시켰다. 또한 이 오차신호를 온도 조절장치로 피드백 시킴으로써 주파수 안정화와 동시에 출력의 변동폭을 0.03% 로 안정화시킬 수 있었다. 그리고 안정화 시킨 흡수선의 신호가 항상 최대가 되도록 유리창의 위치를 조절하는 피드백 회로를 구성함으로써 레이저 주파수를 1주일 이상 안정화시킬 수 있었다. 레이저 주파수의 안정도는 적분시간 1 초에서  $1.2 \times 10^{-10}$  이었다.

#### 참고 문헌

1. H.S. Lee, S.E. Park, J.D. Park, and H. Cho, J. Opt. Soc. Am. B 11, pp.558-563(1994).
2. R.W. Fox, H.G. Robinson, A.S. Zibrov, N. Mackie, J. Marquardt, J. Magyar, L.W. Hollberg, Proceed. SPIE 1837, 360(1992).
3. F. Nez, F. Biraben, R. Felder, and Y. Millerieux, Opt. Commun. 102, 432-438(1993).
4. A. Hemmerich, D.H. McIntyre, C. Zimmermann, and T.W. Hansch, Opt. Lett. 15, 372-374(1990).
5. 노홍렬, 김재욱, 이관일, 이상기, 남동석, 제원호, 새물리 35, pp.14-18(1995).
6. E.L. Raab, M. Prentiss, A. Cable, S. Chu, and A. Pritchard, Phys. Rev. Lett. 59, 2631(1987).
7. 이호성, 오차환, 양성훈, 한국광학회지 3, 123(1992).
8. 박상연, 이호성, 박종대, 조혁, 새물리 34, 401(1994).
9. 문한섭, 김중복, 이호성, 양성훈, 김영범, 새물리 35, pp.191-196(1995).
10. H.S. Lee, S.H. Yang, and N.S. Chung, Rev. Sci. Instrum. 61, pp.1329-1331(1990).
11. H.S. Lee, C.H. Oh, S.H. Yang, and N.S. Chung, Rev. Sci. Instrum. 61, pp.2478-2480(1990).
12. 오차환, 이호성, 양성훈, 송양섭, 새물리 31, 367(1991).
13. 오차환, 이호성, 양성훈, 김진욱, 새물리 31, 658(1991).