

## Wedge prism이 삽입된 단일종모우드 색소레이저 제작

고도경 · 김성호 · 이종민

한국원자력연구소

이성우 · 공홍진

한국과학기술원 물리학과

(1994년 2월 2일 받음)

Wedge prism이 삽입된 Littman형 색소 레이저 공진기를 제작하였다. 파장조정 거울 대신 wedge prism을 회전시킴으로써 미세한 파장조정이 가능함을 알 수 있었으며, 이때의 주파수 변화율은 약 20 GHz/deg이고 모우드 텅없이 단일종모우드로 약 70 GHz를 연속적으로 변화시킬 수 있었다.

### I. 서 론

1966년에 P. P. Sorokin과 J. R. Lankard에 의하여 처음으로 색소 레이저가 발진된 이후<sup>[1]</sup> 색소 레이저는 일정한 파장밖에 낼 수 없었던 레이저의 단점을 극복하고 원자나 분자, 그리고 응집물질의 구조 및 특성을 규명할 수 있는 분광학의 괄목할만한 발전을 가져오게 하였다.<sup>[2]</sup> 그리고 이러한 색소 레이저의 특성을 향상시키기 위하여 여러종류의 공진기 형태가 고안되어 왔다. 그중에 가장 대표적인 것이 grazing incidence with tuning mirror (GIM) 형의 공진기로, 이 공진기의 특징은 광속확대기를 사용하지 않고 회절격자에 아주 큰 각도로 광이 입사하도록 하여 회절격자를 사용하는 단면적을 극대화 시키도록 하였다.<sup>[3]</sup> Littman은 이 공진기 형태에서 종평 평을 채택하고 공진기의 길이를 짧게 함으로써 단일종 모우드 발진이 가능하도록 하였으며 단일종모우드로 연속적인 파장변인이 가능한 pivot point를 찾아내었다.<sup>[4,5]</sup> 이러한 단일 종모우드 색소 레이저 공진기는 Ti:sapphire 레이저나 다이오드 레이저, 그리고 최근에는 optical parametric oscillator에까지 이용되고 있으며, 상업적으로도 사용되고 있는 실정이다.<sup>[6,9]</sup> 한편, 최근에 이러한 Littman형의 공진기에 얇은 wedge prism을 삽입하여 기존의 파장조정거울을 회전시키는 대신 wedge prism을 회전시키게 되면 훨씬 정밀한 파장조정이 가능함이 보고 되었다.<sup>[10]</sup> 본 연구에서는 Littman형 색소 레이저 공진기에 wedge prism을 삽입한 새로운 공진기를 제작하여

wedge prism의 회전에 따른 레이저 파장의 변화를 관찰함으로써 정밀한 파장변인이 가능함을 실증하였다.

### II. 이론적 배경

그림 1은 wedge prism이 삽입된 단일종모우드 색소 레이저 공진기의 일부를 나타낸 그림이다. 여기서  $\theta$ 와  $\delta$ 는 각각 회절격자에서의 입사각과 회절각이며  $\lambda$ 는 발진되는 레이저의 파장이고  $\alpha$ 는 프리즘의 꼭지각이며  $\beta$ 는 파장조정 거울이 회절격자에 대하여 기울어진 각도이다. Littman형 단일종모우드 색소레이저의 발진 파장은 아래와 같은 회절격자식과 공진기 모우드 식에 의하여 결정된다.

$$\sin\theta + \sin\phi = m\lambda/\Lambda \quad (1)$$

$$n\lambda = 2L \quad (2)$$

여기서  $m$ 은 회절광의 차수,  $\Lambda$ 는 회절격자의 간격,  $n$ 은 경계조건을 만족시키는 정수이고  $L$ 은 공진기의 길이이다. 편의상 회절격자에 의하여 결정되는 레이저 주파수를 레이저 모우드라고 하기로 한다. 위 두 식을 프리즘의 기울어진 각으로 미분하면 프리즘의 회전에 따른 발진 주파수의 변화율을 구할 수 있다. 첫 식을 미분한 식은 회절격자에 의한 레이저 주파수 변화율로 다음과 같다.

[10]

$$\left(\frac{d\nu}{d\gamma}\right)_{laser} = -\frac{\Lambda c}{\lambda^2} (1-M)\cos\phi \quad (3)$$

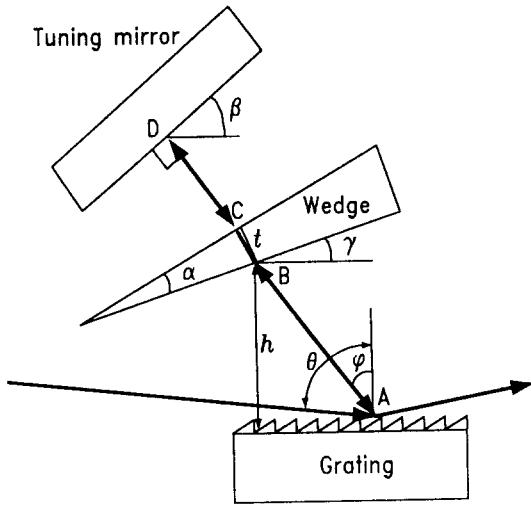


그림 1. Wedge prism이 삽입된 단일종모우드 색소레이저 공진기의 일부.

여기서  $\gamma$ 는 프리즘이 회절격자에 대하여 기울어진 각도이고  $M$ 은 레이저 빛살이 프리즘을 통과했을 때의 확대율에 해당한다. 그리고 프리즘의 회전에 따른 공진기 길이의 변화에 의한 공진기 모우드의 주파수 변화율은 다음과 같다.

$$\left(\frac{dv}{d\gamma}\right)_{cavity} = -\frac{c}{\lambda L} \frac{dL}{d\gamma} \quad (4)$$

레이저가 단일종모우드로 모우드홉(mode-hop)없이 주파수 가변이 이루어지기 위하여는 위 두 식의 값이 같아야 하며 프리즘의 회전에 따라 두 주파수의 차이가 공진기 모우드의 반을 넘으면 모우드홉이 일어나게 된다.

### III. 실험 및 결과

프리즘을 이용한 레이저 주사실험을 이용하여 wedge type 레이저 공진기를 구성하였다. 레이저 공진기는 SLM형 공진기 내부에 두께 3 mm, 꼭지각 2°이고 재질은 BK-7인 얇은 wedge prism을 삽입하였다. 프리즘을 회전시키기 위하여 프리즘을 rotating stage위에 고정시켜 놓고 스테핑 모터를 컴퓨터와 interface시켜 rotating stage를 돌려 주었으며 wedge prism을 돌려가면서 파장이 변해가는 것을 wavemeter(Burleigh, WA-4500)를 사용하여 컴퓨터로 받아보았다. 스테핑 모터를 200 step을 돌렸을 때 rotating stage는 1° 돌아간다. 그림 2는 wedge prism을 이용한 파장가변 실험장치도이다.

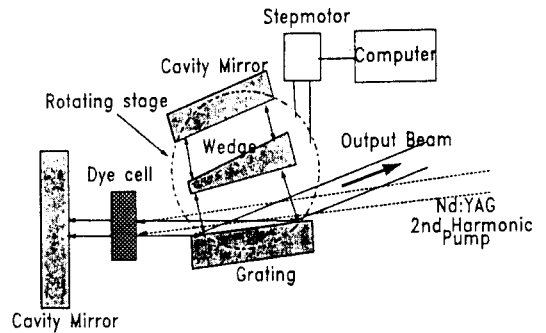


그림 2. Wedge prism을 이용한 파장가변 실험장치도.

펌핑원으로 펄스형 Nd:YAG레이저(Continuum, HY81 C-10)의 제 2 고조파를 사용하였고 색소로는 Rh6G를 사용하였다. Iris diaphragm을 이용하여 펄프광의 크기와 세기를 조절하였고  $\lambda/2$ -plate와 Glan polarizer를 통과시켜 편광상태와 레이저 광의 세기를 조절하였다. 그리고 초점거리가 50 cm인 렌즈를 통해 dye 셀 약간 앞에 펄프광을 집속시켰다. 회절격자는 2400 lines/mm로 격자 사이의 간격은 416.7 nm이다. 이 경우 Rh6G의 발진범위인 542~607 nm 사이에서 격자에 빛을 grazing 입사를 시켜주는 경우 grating 방정식에 의하면 0차와 1차 회절만이 일어나게 된다. 여기서 1차 회절된 빛은 prism을 통과하여 거울에 의하여 반사되어 다시 되돌아오게 되어 레이저 공진기를 구성하게 되며 0차 회절된 빛은 출력광이 된다. 색소레이저 출력의 편광상태는 편광기를 이용하여 회절격자 표면과 수직이 되도록 하였다. 실험에서 iris diaphragm의 직경은 2.3 mm로 유지하였다. 빔이 가우스광임을 가정하면 초점에서 beam waist는 121  $\mu$ m가 되고 이 경우 Rayleigh length는 8.2 cm가 되며 이 거리는 셀에서부터 회절격자까지의 거리 3.5 cm 보다 길게 된다.

그림 3은 발진된 단일 종모우드 레이저광을 에탈론을 통과시켜 얻은 원형의 간섭무늬를 CCD 카메라를 이용하여 찍은 사진이다. Wavemeter를 이용하여 실험적으로 측정된 선폭은 1.84 pm로 약 1.78 GHz이었으며 이것은 종모우드간의 간격이 약 1.7 GHz이고 wavemeter의 분해능이 1.5 GHz임을 고려하면 단일 종모우드임을 알 수 있다. 다음으로 wedge prism을 스테핑 모터로 돌려가면서 파장이 미세변화하는 것을 관찰하였다. 이때의 공진기의 길이는 8.7 cm이고 종모우드간의 간격은 1.7 GHz이다. 그림 4는 프리즘을 회전시킴에 따라 레이저 광의 에탈론 무늬가 이동하는 모습을 보여주고 있다.

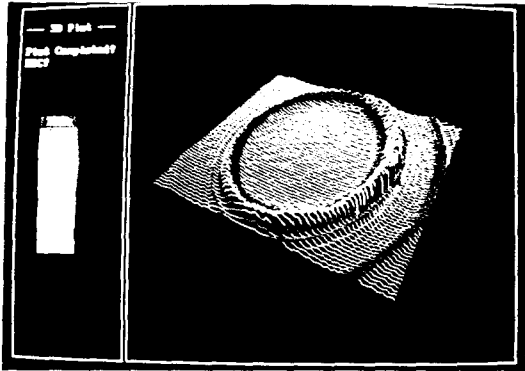


그림 3. 발진된 단일종모우드 레이저광의 에탈론을 통과한 후의 원형 간섭무늬의 CCD 사진.

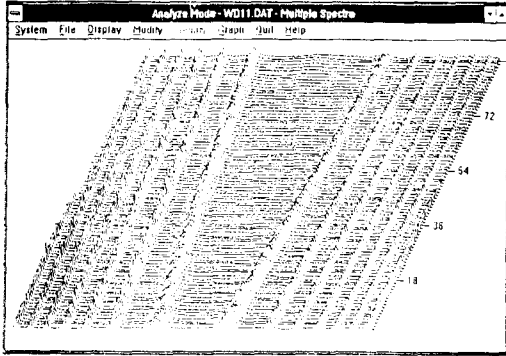


그림 4. Wedge prism의 회전에 따른 에탈론 무늬의 변화.

그림에서 알 수 있듯이 레이저 파장이 연속적으로 변해감을 알 수 있다. 이때 초기각과 파장을 식 (3)과 식 (4)에 넣어주어 공진기 모우드와 레이저 모우드가 일치하는 각을 찾아 주었고 두 개의 모우드가 일치한 때의 파장과 각을 기준점으로 잡아 경로차를 계산한 식으로부터 레이저 발진 주파수와 공진기 모우드 주파수의 변화량을 계산하였다. 그림 5와 그림 6은 각각 파장 555.48 nm에서 프리즘의 기울어진 각이  $11^\circ$  일때와 파장 556.01 nm에서 프리즘의 기울어진 각이  $12^\circ$  일때 프리즘을 회전시킴에 따른 레이저 발진 주파수의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 실선은 발진 주파수 변화의 이론치이고 점선은 공진기 모우드를 나타내고 있으며 인접한 공진기 모우드도 아울러 표시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 이론치와 잘 일치하면서 주파수가 변함을 알 수 있다. 그리고 그림 7은 파장이 555.41 nm에서 같은 방법으로 측정된 결과로 이 경우에는 레이저가 인접한 공진기 모우드로 모우드 뛴이 일어나고 있음을 보여주고

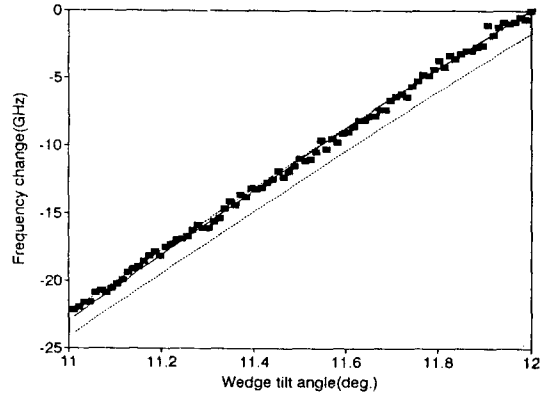


그림 5. 파장 555.48 nm에서 프리즘회전에 따른 레이저 발진주파수의 변화: 네모는 실험값, 실선은 레이저 모우드, 점선은 공진기 모우드를 나타낸다.

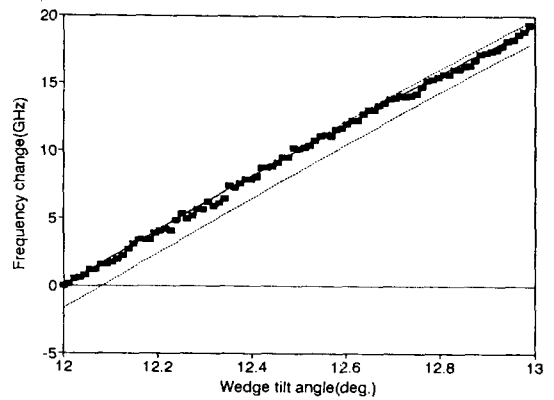


그림 6. 파장 556.01 nm에서 프리즘회전에 따른 레이저 발진주파수의 변화: 네모는 실험값, 실선은 레이저 모우드, 점선은 공진기 모우드를 나타낸다.

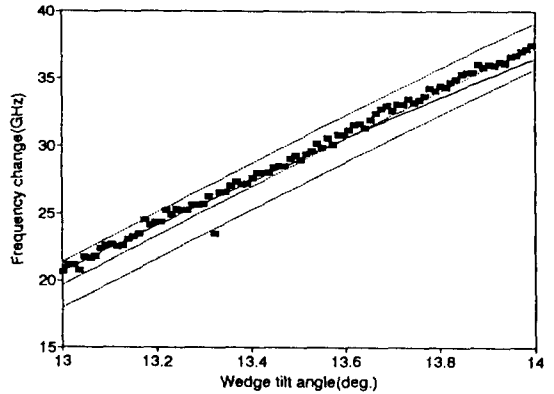


그림 7. 파장 555.41 nm에서 프리즘회전에 따른 레이저 발진주파수의 변화: 네모는 실험값, 실선은 레이저 모우드, 점선은 공진기 모우드를 나타낸다.

있다. 실험과정에서 측정이 연속적이지 못해서 측정때마다 파장이 약간씩 차이가 있었다. 따라서 각 구간에서의 데이터를 연속적으로 함께 이어 그리지 못하고 각 구간에 따라 나타낼 수 밖에 없었다. 이론적으로 모우드가 hopping없이 가변시킬 수 있는 두 모우드의 차가 종모우드 간격보다 작은 구간을 구한 결과 파장에 따라 약간의 차이는 있지만 10.25~13.55 사이에서 약 70 GHz의 주파수가 종모우드 간격보다 작은 범위에 있음을 알 수 있었으며 실험에서도 모우드 hopping없이 약 69.1 GHz의 파장을 변화시킬 수 있어서 이론과 잘 일치하고 있다. 각각의 그래프에 나타난 일반적 경향을 보면 파장은 레이저 모우드를 따라 변하고 있는 모습을 보이고 있으며, 레이저 모우드를 따라 변하는 도중 공진기 모우드와 멀어지고 다른 공진기 모우드에 가까이 가면 레이저 모우드에서 가까운 공진기 모우드로 모우드뎀이 일어나고 이 공진기 모우드와 멀어지면 레이저 모우드를 따라 변하고 있는 모습을 보여주고 있다. 이렇게 레이저 모우드를 따라 레이저 파장이 변하고 있는 이유는 좀더 연구해야 할 과제라고 생각하며 현재로서는 레이저 공진기의 finesse가 크지않은 영향이 아닌가 추측하고 있다.

#### IV. 결론 및 논의

Wedge prism이 삽입된 개량된 Littman형 색소 레이저 공진기를 제작하여 파장가변 실험을 수행하였다. 파장 조정거울 대신 wedge prism을 회전시키며 파장을 가변시킨 결과 약 20 GHz/deg의 아주 정밀한 파장 변화율을 얻을 수 있었으며 모우드 뎀없이 약 70 GHz 만큼의 주파수를 연속적으로 변화시킬 수 있었다. 외부의 온도나 압력의 변화의 영향을 줄이게 되면 더욱 넓은 영역에서

모우드 뎀없이 연속적인 파장가변이 가능하게 될 것으로 생각되며 또한 전반사경에 PZT 등을 부착하여 프리즘의 회전에 따라 발생하는 주파수 변화량의 차이를 공진기 길이를 변화시켜 줌으로써 보상하게 되면 파장가변 영역을 훨씬 넓힐 수 있으리라 생각한다. 이러한 파장가변 방법은 단일종모우드로 발진하는 파장가변 고체 레이저, 다이오우드 레이저, optical parametric oscillator와 같은 다른 공진기에도 널리 응용될 수 있다고 생각된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] P. P. Sorokin and J. R. Lankard, IBM J. Res. Develop. **10**, 162(1966).
- [2] F. J. Duarte and L. W. Hillman, *Dye Laser Principles with Application*, (Academic Press, New York, 1990) Chap. 8-10.
- [3] K. Liu and M. G. Littman, Opt. Lett. **6**, 117(1981).
- [4] M. G. Littman, Appl. Opt. **23**, 4465(1984).
- [5] T. D. Raymond, P. Esherick, and A. V. Smith, Opt. Lett. **14**, 1116(1989).
- [6] Y. Maruyama, M. Kato, and T. Arisawa, Jap. J. Appl. Phys. **30**, L748(1991).
- [7] K. W. Kangas, D. D. Lowenthal, and C. H. Muller III, Opt. Lett. **14**, 21(1989).
- [8] K. C. Harvey and C. J. Myatt, Opt. Lett. **16**, 910(1991).
- [9] W. R. Bosenberg and D. R. Guyer, Appl. Phys. Lett. **61**, 387(1992).
- [10] 고도경, 김성호, 김중복, 이종민, 한국물리학회보 **11**(2), 309(1993); D. K. Ko, S. H. Kim, J. B. Kim, J. M. Lee, S. A. Kostitsa, and V. A. Mishin, Appl. Opt. Submitted.

### Construction of the Single Longitudinal Mode Dye Laser Inserted a Wedge Prism

Do-Kyeong Ko, Sung Ho Kim and Jongmin Lee  
Korea Atomic Energy Research Institute, Taejon 305-600, Korea

Sung Woo Lee and Hong-Jin Kong  
Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejon 305-701, Korea

(Received: February 2, 1994)

A Littman type dye laser oscillator inserted a wedge prism was constructed. Accurate frequency tuning was achieved by the rotation of the wedge prism instead of the tuning mirror. Frequency tuning rate was about 20 GHz/deg. and the synchronous tuning of 70 GHz without mode-hop was achieved.