

## 이중공명 광펌핑을 이용한 고분해 분광

### High Resolution Spectroscopy Using Double Resonance

#### Optical Pumping

문한섭, 이원규, 김중복\*

한국표준과학연구원, 정보통신표준센터

\*한국교원대학교, 물리교육과

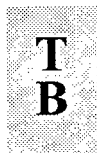
hsmoon@kriss.re.kr

여기준위 사이에서의 원자분광은 고분해 분광, 원자의 레이저 냉각 및 포획, 그리고 광통신 파장영역에서의 광주파수 기준 등에 많이 이용되고 있다. 광-광 이중공명 (optical-optical double-resonance; OODR) 기술은 원자나 분자의 여기준위 전이선에 대한 고분해 분광에 널리 이용되고 있으며, V-형,  $\Lambda$ -형, 그리고 사다리형과 같이 3준위 원자계에서 두 레이저 광과 상호작용에 의한 방법이다. 특히, 사다리형 OODR은 그림 1(a)와 같이 바닥준위 원자들이 중간 여기준위로 펌핑된 후 중간 여기준위와 최상 여기준위 사이에 흡수를 측정함으로써 원자의 여기준위 사이의 전이선에 대한 분광에 매우 유용한 구도를 가지고 있다. 이러한 방법으로 H. Sasada는 Rb 원자의 5S-5P-6S 전이선과 5S-5P-4D 전이선을 이용하여 1.3  $\mu\text{m}$  와 1.5  $\mu\text{m}$  파장영역의 전이선에 대한 파장을 측정하였고<sup>1</sup>, S. L. Gilbert와 M. Breton 등은 광섬유 레이저와 DFB 레이저의 주파수를  $^{87}\text{Rb}$  원자의 5P<sub>3/2</sub>-4D<sub>5/2</sub> 전이선에 안정화했다<sup>2-4</sup>.

그러나, Rb 원자와 같은 알칼리족 원자들은 초미세 구조를 가지고 있기 때문에 그림 1(b)와 같이 다양한 자발방출 경로를 가질 수 있다. 이와 같이 다른 준위로의 손실이 많은 원자계에서는 중간 여기준위에 원자밀도가 상대적으로 줄어들고, 여기준위 사이에 흡수를 감지하여 얻어지는 OODR 스펙트럼의 신호잡음비는 나빠진다. 본 연구에서는 이러한 원자계에서 높은 신호대잡음비를 갖는 고분해분광 방법을 제안하고, 이 방법을 이용하여  $^{87}\text{Rb}$  원자의 5P<sub>3/2</sub>  $\rightarrow$  4D<sub>3/2</sub> 과 4D<sub>5/2</sub> 전이선에 대한 분광 스펙트럼을 측정하였다.

본 연구에서 제안한 방법은 자발방출에 의해서 다른 준위로 빠져나가는 광펌핑 효과를 이용하는 것이다. 그림 1(b)에서 보는 것처럼 바닥준위에 원자는 공진하는 두 레이저에 의해서 최상준위와 중간 여기준위를 거쳐 다른 바닥준위로 광펌핑이 일어난다. 이 때 최상 여기준위에서 자발방출은 여러 가지 경로를 통해서 레이저와 상호작용이 없는 다른 준위로 전이가 일어나면서 상대적으로 바닥준위의 원자밀도가 줄어든다. 이러한 현상을 이용하여 여기준위 사이에서 공진하는 레이저 주파수에 따른 바닥준위의 원자밀도 변화를 측정하게 되면 좁은 선폭을 가진 높은 신호대잡음비를 갖는 스펙트럼을 얻을 수 있다. 우리는 이 스펙트럼을 이중공명 광펌핑(double resonance optical pumping; DROP) 스펙트럼이라고 부른다.

$^{87}\text{Rb}$  원자는 1차 여기상태 5P<sub>3/2</sub> 와 2차 여기상태 4D<sub>3/2</sub> 과 4D<sub>5/2</sub> 사이에 각각 1529.26 nm와 1529.37 nm의 공진파장을 가지고 있다. 780 nm 레이저를 5S<sub>1/2</sub>(F=2)  $\rightarrow$  5P<sub>3/2</sub>(F'=3) 전이선에 안정화하고 1529 nm 레이저를 약 20 GHz 범위에서 주사하여 약 14 GHz 떨어져 있는 두 미세구조의 스펙트럼을 측정했다. 그림 2는  $^{87}\text{Rb}$  원자의 5P<sub>3/2</sub>  $\rightarrow$  4D<sub>3/2</sub> 과 5P<sub>3/2</sub>  $\rightarrow$  4D<sub>5/2</sub> 전이선의 OODR 신호와 DROP 신호를 동시에 측정



한 스펙트럼이다. 여기서 회색선은 1529 nm 레이저에서 검출된 OODR 신호이고, 흑색선은 780 nm 레이저에서 검출된 DROP 신호이다. 이 때 780 nm 와 1529 nm 레이저의 출력은 각각 78  $\mu$ W와 0.5 mW였다. 그림 2에서 알 수 있는 것처럼 OODR 신호는 흡수로 나타나고, DROP스펙트럼은 투과로 나타난다. OODR 신호는 1차 여기상태  $5P_{3/2}$  에 있는 원자들이 2차 여기상태  $4D_{3/2}$ 과  $4D_{5/2}$ 로 전이할 때 조사광이 흡수되는 것이고, DROP 신호는 바닥상태( $5S_{1/2}(F=2)$ )의 원자가 다른 바닥상태( $5S_{1/2}(F=1)$ )로 광펌핑이 일어나는 효과로 인해 바닥상태( $5S_{1/2}(F=2)$ )의 밀도가 줄어들면서 조사광의 투과 현상이 일어나는 것이다.

결론적으로 우리는 이중공명 광펌핑(double resonance optical pumping; DROP)효과를 이용하여 루비듐( $^{87}\text{Rb}$ ) 원자의  $5P_{3/2}$ - $4D_{3/2}$ 와  $5P_{3/2}$ - $4D_{5/2}$  전이선에서 DROP 스펙트럼을 관측하였다. 관측한 DROP 스펙트럼은 기존의 광-광 이중공명(optical-optical double resonance; OODR) 스펙트럼보다 높은 신호대잡음비를 가지며, 약 10 MHz의 좁은 선폭을 갖고 있다. DROP 스펙트럼의 상대적인 세기는 자발방출에 의한 광펌핑 정도로 설명할 수 있었다.

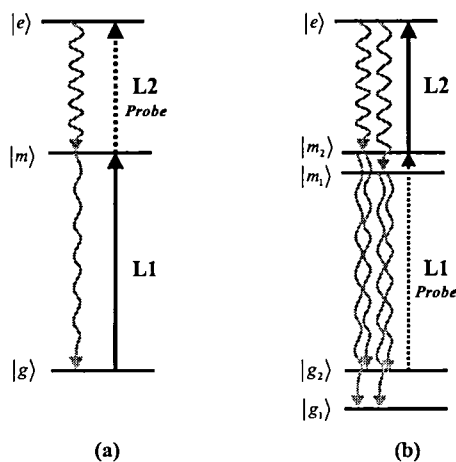


그림 1. 사다리형 원자계  
(a) 3준위 원자계에서 OODR  
(b) 5준위 원자계에서 DROP

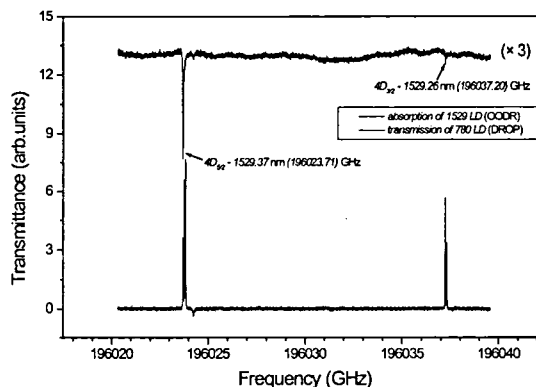


그림 2.  $^{87}\text{Rb}$ 원자의  $5P_{3/2} \rightarrow 4D_{3/2}$  과  $4D_{5/2}$  전이선의 OODR 스펙트럼과 DROP 스펙트럼  
(흑색 : DROP, 회색 : OODR)

1. H. Sasada, "Wavelength measurements of the sub-Doppler spectral lines of Rb at 1.3  $\mu\text{m}$  and 1.5  $\mu\text{m}$ ," IEEE Phot. Technol. Lett., Vol. 4, No. 11, pp. 1307-1309 (1992).
2. S. L. Gilbert, "Frequency stabilization of a fiber laser to rubidium: a high-accuracy 1.53  $\mu\text{m}$  wavelength standard," in Proc. SPIE 1837: Frequency Stabilized Lasers and Their Applications, Boston, MA, pp. 146-153 (1992).
3. M. Breton, P. Tremblay, N. Cyr, C. Julien, M. Têtu, and B. Villeneuve, "Observation and characterization of  $^{87}\text{Rb}$  resonances for frequency-locking purpose of a 1.53  $\mu\text{m}$  DFB laser," in Proc. SPIE 1837: Frequency Stabilized Lasers and Their Applications, Boston, MA, pp. 134-143 (1992).
4. M. Breton, P. Tremblay, C. Julien, N. Cyr, M. Têtu, and C. Latrasse, "Optically pumped rubidium as a frequency standard at 196 THz," IEEE Trans. Instru. Meas., Vol. 44, No. 2, pp. 162-165 (1995).