

DROP을 이용한 ^{87}Rb $4D_{5/2}$ 상태의 절대 에너지와 초미세 구조 측정

Measurement of absolute energy level and hyperfine structure of ^{87}Rb $4D_{5/2}$ state by using DROP

문한섭, 이원규*, 서호성*

부산대학교 물리학과, *한국표준과학연구원
hsmoon@pusan.ac.kr

원자나 분자에서 여기준위들 간의 전이선은 레이저 쿨링, 광 이온화, 그리고 광통신 파장에서의 광주파수 표준 등 여러 분야에서 활용되고 있다⁽¹⁻²⁾. 그러나 여기준위들 간의 전이선에서의 고분해 분광은 열평형 상태에서 여기준위의 낮은 밀도 때문에 바닥준위를 포함한 전이선에서의 고분해 분광에 비해 어렵다. 이러한 점을 해결하기 위해서 Hollow-cathode lamps 나 microwave discharge lamps, 광펌핑이 원자분광에서 이용되고 있다.

여기준위 광-광 이중공명 (optical-optical double-resonance; OODR) 분광법은 원자나 분자의 V-형, Λ -형, 그리고 사다리형과 같이 3준위 모델에서 두 레이저 광과 상호작용을 이용한 고분해 분광 방법으로 널리 이용되고 있다. 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. 여기준위 사이에서의 분광은 고분해 분광, 원자의 레이저 냉각 및 포획, 그리고 광통신 파장영역에서의 광주파수 기준 등과 같은 분야에서 이용되고 있다. OODR 방법을 이용하여 Rb원자의 $5S-5P-4D$ 전이선에서 $1.3\ \mu\text{m}$ 와 $1.5\ \mu\text{m}$ 파장영역의 전이선에 대한 파장을 측정하였고⁽²⁾, 광섬유 레이저와 DFB레이저의 주파수를 ^{87}Rb 원자의 $5P_{3/2}-4D_{5/2}$ 전이선에 안정화했다.

그러나, Rb원자와 같은 알칼리족 원자들은 바닥 준위에 초미세 구조를 가지고 있기 때문에 그림 1(b)와 같이 다양한 자발방출 경로로 다른 바닥준위로 광펌핑이 일어날 수 있다. 이와 같이 다른 준위로의 손실이 많은 원자계에서는 중간 여기준위에 원자밀도가 상대적으로 줄어들고, 여기준위 사이에 흡수를 감지하여 얻어지는 OODR 스펙트럼의 신호가 줄어들게 된다. 최근에 우리는 이러한 원자계에서 높은 신호대잡음비를 갖는 고분해분광 방법을 제안하고, 이 방법을 이용하여 ^{87}Rb 원자의 $5P_{3/2} \rightarrow 4D_{3/2}$ 과 $4D_{5/2}$ 전이선에 대한 분광 스펙트럼을 측정하였다⁽³⁻⁴⁾. 제안된 방법은 자발방출에 의해서 다른 준위로 빠져나가는 광펌핑 효과를 이용하는 것이다. 그림 1(a)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⁽³⁻⁴⁾.

본 연구에서는 펄스 레이저 주파수 광빔을 이용하여 ^{87}Rb 원자의 $5P_{3/2} \rightarrow 4D_{5/2}$ 전이선의 절대 주파수를 처음으로 측정하였다. 특히 $4D_{5/2}$ 상태의 세 개의 초미세 구조를 기존 분광 방법인 OODR로 측정할 수 없지만, DROP의 장점을 이용하여 세 개의 초미세 구조의 절대 주파수를 측정할 수 있었다. 본 연구에서는 그림 1의 (a)에 있는 L1 레이저, 780 nm 파장 영역에서 공진하는 $5S_{1/2} \rightarrow 5P_{3/2}$ 전이선 (D_2 선),는 포화흡수 분광 스펙트럼을 이용하여 주파수 안정화하였고, L2 레이저는 그림 1의 (b)에서 보여지는 DROP 스펙트럼을 이용하여 각 초미세 전이선에 안정화하였다. 그림 2는 L1 레이저와 L2 레이저를 광 주파수 빔을 이용하여 절대주파수 측정할 때 얻어진 Allan 분산을 나타내고 있다.

이러한 결과로부터 우리는 기존에 측정되어 있던 magnetic dipole constant, A의 불확도를 약 60배 줄인 (-16.747 ± 0.010) MHz로 결정할 수 있었고, 더욱이 기존에 측정되어 있지 않았던 electric quadrupole constant, B를 (4.149 ± 0.059) MHz 결정하였다⁽⁵⁾.

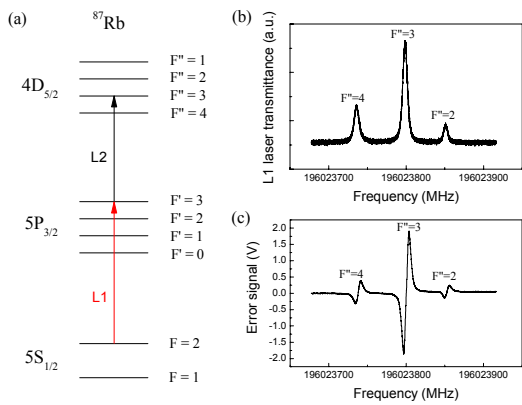


그림 1. (a) ^{87}Rb 원자 $5S_{1/2} - 5P_{3/2} - 4D_{5/2}$ 전이선의 에너지 준위도
 (b) ^{87}Rb , $5P_{3/2}(F''=3) - 4D_{5/2}(F''=2,3,4)$ 전이선에서의 DROP 스펙트럼
 (c) DROP 스펙트럼에 레이저 주파수 안정화를 위한 error signal

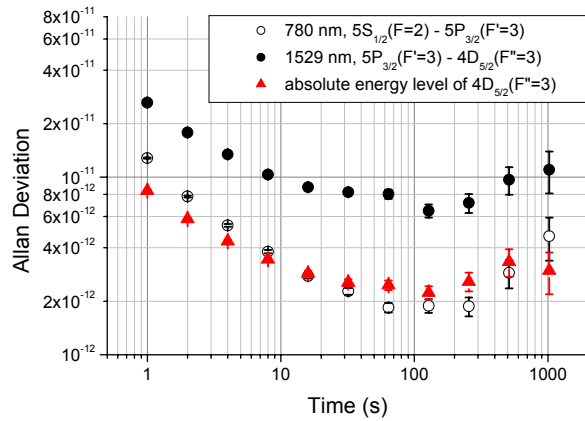


그림 2. 절대 주파수 측정에서의 Allan 분산 (백색원) 포화흡수 분광을 이용하여 주파수 안정화된 L1 레이저 (흑색원) DROP신호에 안정화된 L2 레이저 (삼각형) $4D_{5/2}$ 상태의 절대 에너지 측정의 Allan 분산

1. M. Breton, P. Tremblay, C. Julien, N. Cyr, M. Tetu, and C. Latrasse, "Optically pumped rubidium as a frequency standard at 196 THz", IEEE Trans. Instr. Meas., vol.44, no.2, pp.162-165 (1995).
2. H. Sasada, "Wavenumber measurements of sub-Doppler spectral lines of Rb at 1.3 mm and 1.5 mm", IEEE Photon. Techn. Lett. vol.4, no.11, pp.1307-1309 (1992).
3. H. S. Moon, W. K. Lee, L. Lee, and J. B. Kim, "Double resonance optical pumping spectrum and its application for frequency stabilization of a laser diode", Appl. Phys. Lett., vol.85, no.18, pp.3965-3967 (2004).
4. Won-Kyu Lee, Han Seb Moon, and Ho Suhng Suh, "Measurement of absolute energy level and hyperfine structure of ^{87}Rb $4D_{5/2}$ state", Opt. Lett. vol. 32, no. 19, pp. 2810-2812 (2007).