

# 루비듐 원자 $D_1$ 전이선에서 편광에 따른 결맞음 밀도 포획

## Coherent population trapping according to the polarization of the laser sources in the $D_1$ line of Rb atoms

문한섭

부산대학교 물리학과

[hsmoon@pusan.ac.kr](mailto:hsmoon@pusan.ac.kr)

빛과 원자와의 상호작용 연구에 있어서 위상 결맞음 다중 주파수 광원과 3준위 이상의 다중 준위와의 상호작용으로 원자 결맞음 현상에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이와 같은 원자 결맞음에 의해서 나타나는 대표적인 현상 중에 하나가 결맞음 밀도 포획 (coherent population trapping: CPT) 이다. 결맞음 밀도 포획은 양자간섭 효과에 의해서 원자의 전이선과 공진하는 주파수를 가진 레이저와 원자가 상호작용함에도 불구하고 원자의 에너지 준위의 밀도에 변화 없이 레이저가 투과하는 현상이다. 이러한 결맞음 밀도 포획 현상은 원자의 여기준위에 자연선평 보다 1000배 이상 좁은 선평을 가지고 있고, 결맞음 밀도 포획 스펙트럼이 상호작용하는 광원의 주파수 차이로 나타나는 특성을 이용하여 알카리족 원자의 초미세 구조의 두 바닥 준위 사이에서 결맞음 밀도 포획 스펙트럼을 얻고, 이것을 이용하여 원자시계 개발에 이용하고 있다<sup>(1)</sup>. 한편, 외부 자기장에 따라서 초미세 전이선의 자기부준위 사이에 주파수 차이가 발생하고 이 자기부준위들과 광원의 상호작용으로 결맞음 밀도 포획 스펙트럼을 측정하여 이용함으로써 고감도 원자 자계 연구에 이용하고 있다<sup>(2)</sup>. 이와 같이 결맞음 밀도 포획 현상은 다양한 방법으로 연구가 되고 있을 뿐만 아니라 레이저를 이용한 잘 알려진 고분해 레이저 분광연구에서도 설명할 수 없었던 스펙트럼의 다양한 현상들을 결맞음 밀도 포획 효과를 고려함으로써 이해되어지고 있다.

한편, 결맞음 밀도 포획 연구에 이용되는 광원의 특성은 서로 다른 주파수 성분을 가지고 있으면서 두 주파수 성분 사이에 위상 잡음이 작다. 물론 축퇴되어 있는 자기부준위 사이에서의 결맞음 밀도 포획은 하나의 주파수 성분만을 가지고 있기 때문에 예외가 될 것이다. 그러나 원자시계 연구와 같은 초미세 구조 사이에 결맞음 밀도 포획의 경우는 CPT스펙트럼의 선평에 영향을 주지 않을 만큼 두 주파수 성분의 위상 잡음이 작은 광원을 이용하여야 한다. 이러한 광원을 만들기 위해서 레이저의 주파수를 변조시키는 방법이 있다. 이 방법은 가장 많이 사용되는 방법으로 반도체 레이저의 전류에 직접 변조를 하는 방법과 외부에 위상변조기를 이용하는 방법이 사용되고 있고, 소형 원자시계 개발에는 주로 직접 변조 방법을 이용한다<sup>(1)</sup>. 원자시계에 이용되는 CPT스펙트럼은 주파수 기준으로 이용되기 때문에 외부 환경에 따라서 스펙트럼의 주파수 이동이 작은 전이선을 이용한다. 따라서 외부 자기장에 의한 영향이 가장 작은 자기부준위인  $m=0$  준위들을 이용한다. 이와 같이  $m=0$ 인 준위들 사이에 결맞음 밀도 포획이 일어나기 위해서 대부분의 연구들은 원편광된 레이저를 이용하고 있다. 이들 연구에서 원편광된 레이저를 이용하는 다른 이유는 두 성분의 주파수 성분의 광원을 분리할 수 없기 때문에 다양한 편광 성분에 대한 연구가 어렵기 때문이다<sup>(1-2)</sup>.

본 연구에서는 루비듐 원자의  $D_1$  전이선에서 레이저의 편광에 따른 결맞음 밀도 포획 연구를 주입잡금된 레이저를 이용하여 수행하였다. 결맞음 밀도 포획 연구를 주입잡금된 레이저를 이용하여 결맞음 밀도 포획연구에 적합한 두 주파수 성분을 얻었다<sup>(3-4)</sup>. 뿐만 아니라 주입잡금 방법을 이용하면 두 주파수 성분에 광원을 독립적으로 조작성이 가능하기 때문에 다양한 편광과 두 주파수 성분의 출력비를 조절하면서 연구가 가능하다.

그림 1은 반도체 레이저의 주입잠금을 이용하여 두 주파수 성분을 생성시키고 이 광원을 이용하여 다양한 편광조합에 따른 결맞음 밀도 포획 스펙트럼을 조사하는 실험 도식도이다. 주입잠금된 LD2와 주 레이저로 사용하는 LD1의 편광을 독립적으로 조절할 수 있도록 구성하였다. 외부 자기장을 효과를 줄이기 위해서  $\mu$ -metal로 루비듐 증기 셀을 싸고 증기 셀에 일정한 온도로 가열하기 위해서 전기 열선을 설치하였다. 또한 레이저 진행방향으로 약한 자기장을 걸어주기 위해서 솔레노이드 코일을 설치하였다. 그림 2는 자기 부준위 사이에 결맞음 포획 구도를 나타내고 수직인 두 선편광에 의해서 만들어지는 전형적인 CPT 스펙트럼을 보여주고 있다.

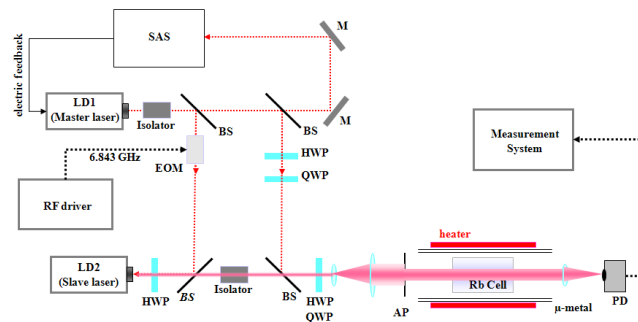
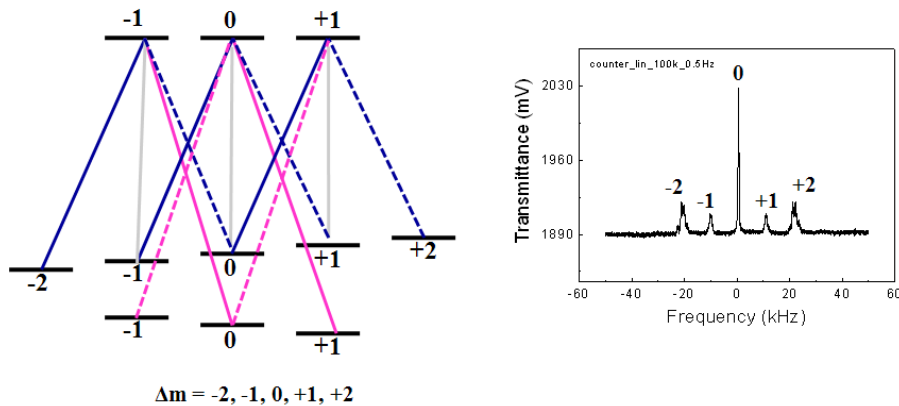


그림 1. 결맞음 밀도포획을 위한 실험장치도



$$\Delta m = -2, -1, 0, +1, +2$$

그림 2. 루비듐 D1전이선에서 자기부준위 사이에 결맞음 밀도 포획 구도와 전형적인 CPT 스펙트럼

1. J. Kitching, S. Knappe, and L. Hollberg, "Miniature vapor-cell atomic-frequency references," Appl. Phys. Lett. 81, 553-555 (2002).
2. M. Fleischhauer and M. O. Scully, "Quantum sensitivity limits of an optical magnetometer based on atomic phase coherence," Phys. Rev. A 49, 1973-1986 (1994).
3. H. S. Moon, S. E. Park, Y. H. Park, L. Lee, and J. B. Kim, "Passive atomic frequency standard based on coherent population trapping in  $^{87}\text{Rb}$  using injection-locked lasers," J. Opt. Soc. Am. B 23, 2393-2397 (2006).
4. 배인호, 문한섭, 김지나, "광 주입-잠금된 반도체 레이저의 모드 분석," 한국광학회지, 18, 317-322, (2007).