

냉각된 루비듦 원자를 이용한 3준위 Λ -구조 원자계에서의 비선형 분광학

Nonlinear spectroscopy of cold rubidium atoms in three-level Λ -type systems

박성종, 조 혁, 박종대*, 권택용**, 이호성**

충남대학교 물리학과, *배재대학교 전산전자물리학과, **한국표준과학연구원

goodtime@kriss.re.kr

최근 레이저 쿨링 및 포획 기술은 다양한 과학적 분야에 응용되고 있다. 포획 원자는 고밀도 매질이며 100 μ K 이하의 온도를 갖기 때문에 레이저 분광학 분야에서 큰 관심을 갖게 되었다. 포획된 원자에 대한 분광학적 특성 조사는 원자의 운동학적 상태뿐만 아니라 포획 원자의 내부 상태에 대한 정보를 제공해 주기 때문에 포획 및 냉각 실험에 필수라고 할 수 있다.

펌프광과 조사광을 이용한 분광법은 원자와 빛의 상호작용을 연구하는데 유용한 도구이다. 펌프광이 작용하면 상호작용 과정과 매질에 대한 정보를 검출광으로 얻을 수가 있다. 3 준위 구조에서 강한 결합광과 약한 조사광을 이용하면 Λ 또는 V 구조의 전자기 유도 투과 (electromagnetically induced transparency ; EIT) 현상을 관찰할 수 있다. EIT는 1991년 Boller에 의해 처음 관찰되었다. EIT 실험은 원자 증기셀, 원자 빔에 대하여 수행되었고, 최근 포획된 원자를 대상으로 Λ 또는 V 구조의 EIT 현상에 대한 실험 결과가 보고되었다^(1,2).

초고진공 챔버 속에 루비듦 원자를 MOT(magneto-optical trap)로 포획하였다. 포획 원자를 대상으로 분광 실험을 하기 위한 장치도는 그림 1과 같다. 리펌핑광(펌프광)과 검출광은 편광 광분할기를 사용하여 서로 수직인 선편광을 갖도록 하였고 편광판을 사용하여 검출광만 검출할 수 있도록 하였다. 루비듦-87 원자의 에너지 준위는 그림 2와 같다. ω_i 는 포획광의 주파수, ω_r 는 리펌핑광의 주파수이다. 리펌핑광은 원자를 포획할 때 F=1의 원자를 F=2로 광펌핑하기 위해 사용된다. 따라서 ω_r 은 ω_{11} 또는 ω_{12} 일 때 원자들을 F=1로부터 F=2로 광펌핑이 가능하며 원자 포획이 가능하게 된다. 여기서 ω_{ij} 는 $|F=i\rangle \rightarrow |F'=j\rangle$ 전이의 공진 주파수이다.

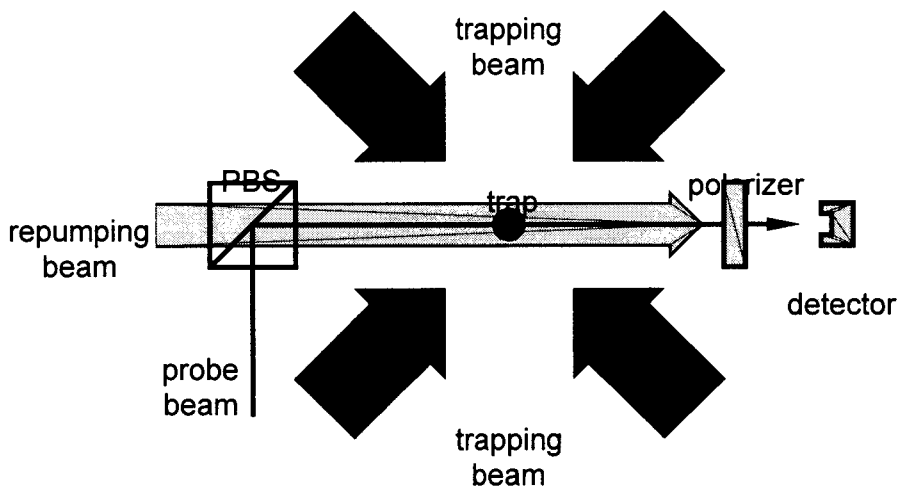


그림 1. 실험 장치도.

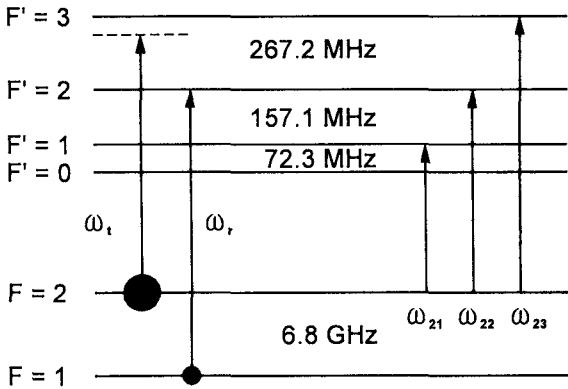


그림 2. 루비듐-87 원자의 에너지 준위.

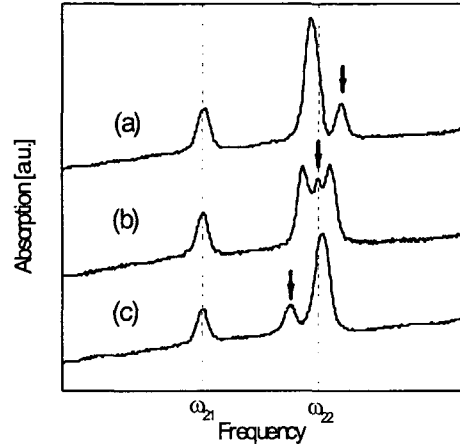


그림 3. 분광 신호.

MOT에 포획된 원자는 평균 속도 성분이 0이기 때문에 검출광을 $F=2 \leftrightarrow F'=1, 2, 3$ 으로 sweep하면 도플러 확대가 제거된 세 개의 흡수신호를 관찰할 수 있다. 이 신호들에 해당하는 검출광의 주파수(ω_p)는 그림 2의 ω_{21} , ω_{22} , ω_{23} 이다. 이 때 리펌핑광의 주파수(ω_r)와 검출광의 주파수(ω_p)가 $\omega_r - \omega_p = \Delta\omega_{hf}$ 를 만족할 때 Λ -구조가 형성된다. 여기서 $\Delta\omega_{hf}(=6.8 \text{ GHz})$ 는 두 바닥상태 준위($F=1, F=2$)들 사이의 주파수 차이이다.

그림 3은 리펌핑광의 주파수 위치(화살표)에 따른 검출광의 흡수 스펙트럼의 변화를 보여주고 있다. 예를 들면, 그림 3. (b)에서와 같이 화살표가 ω_{22} 위치에 있을 때, 리펌핑광의 주파수는 $\omega_{12}(= \omega_{22} + \Delta\omega_{hf})$ 가 된다. 그림 3 (a)는 리펌핑광의 주파수를 ω_{12} 보다 높은 쪽으로 이동하였을 때이고, 그림 3 (c)는 ω_{12} 보다 낮은 쪽으로 이동하였을 때이다. 이상적인 Λ 구조 3준위 원자계에서 두 레이저광(리펌핑광과 검출광)의 주파수 차이가 두 바닥상태의 주파수 차($\Delta\omega_{hf}$)와 일치할 경우, 일반적으로 강한 결합광의 영향으로 검출광은 공진 주파수에서 투과하게 되고 공진 주파수를 중심으로 두 개의 분리된 흡수 신호가 관찰된다. 그러나 그림 3. (b)를 보면 두 개의 분리된 흡수 신호 사이에 또 하나의 흡수 신호가 존재하는 것을 볼 수 있다.

실제 원자계에서 각 F와 F'준위는 축퇴된 제만 부준위를 갖고 있다. 따라서 두 바닥 준위 사이의 CPT 상태 뿐만 아니라 한 바닥상태 내에서도 독립적인 CPT 상태를 갖게 된다⁽³⁾. 이 때 V, double-V, Λ , double- Λ 형태의 복잡한 전이가 가능하기 때문에 실험에서 얻게 되는 분광신호는 복잡한 상호작용의 결과이다. 본 발표에서는 제만 부준위를 고려한 3준위 Λ 구조 원자계에 대한 밀도행렬 방정식⁽³⁾을 이용해 펌프광(리펌핑광)의 세기와 주파수 변화에 따른 각 준위의 밀도 변화 및 준위들 사이의 결맞음 변화를 살펴 보고, 이상적인 Λ 구조에서의 분광신호와 실제 원자를 대상으로 얻은 분광신호를 비교한다.

[참고 문헌]

1. S. A. Hopkins, E. Usadi, H. X. Chen, and A. V. Durrant, Opt. Comm. 138, 185 (1997).
2. H. X. Chen, A. V. Durrant, J. P. Marangos, and J. A. Vaccaro, Phy. Rev. A 58, 1545 (1998).
3. H. Y. Ling, Y. Li, and M. Xiao, Phy. Rev. A 53, 1014 (1996).