

가간섭 밀도 포획 상태의 밀도 Populations of Coherent Population Trapped States

박종대, 조창호, 박상언*, 이호성*, 조혁**

배재대학교 자연과학부, *한국표준과학연구원 시간 주파수실, **충남대학교 물리학과
jdpark@pcu.ac.kr

최근 레이저에 의해 유도된 원자의 가간섭성으로 인한 현상들에 대한 이론적, 실험적 연구가 많이 진행되고 있다. 가간섭 밀도 함정상태의 형성⁽¹⁾, 전자기 유도 흡수 현상(EIA), 전자기 유도 투과 현상(EIT), 밀도 반전 없는 레이저 발진, 매우 높은 굴절률을 갖는 매질의 형성, Hanle 효과, 양자 맥놀이 현상등은 원자의 가간섭성으로 인한 것 들이다.

이 중 전자기 유도 투과 현상(Electromagnetically Induced Transparency: EIT)은 알칼리 원자에서와 같이 바닥상태들이 축퇴되어 있고, 여기상태의 수가 바닥상태의 수보다 작을 경우 결합광에 의해 조사광의 흡수가 감소하는 현상이다. EIT는 레이저에 의해 원자가 밀도 포획상태라는 가간섭 상태에 있게 되어 더 이상 레이저와 상호작용을 하지 않게 되기 때문에 생겨난다.

본 논문에서는 EIT 현상을 유도하는 밀도포획상태의 밀도가 결합광 전기장의 크기에 따라 어떻게 변화하는지를 밀도 행렬 방정식을 풀어 설명하였다. 루비듐 원자 ⁸⁷Rb D1 전이선에서 바닥상태는 그림 1에서와 같이 $F=2$ 일때 $|2, -2\rangle, |2, -1\rangle, |2, 0\rangle, |2, 1\rangle, |2, 2\rangle$ 의 5개 지만 부준위가 존재하고, 여기 상태는 $F=1$ 일때 $|1, -1\rangle, |1, 0\rangle, |1, 1\rangle$ 의 3개의 지만 부준위가 존재한다. 바닥상태와 여기상태간의 천이선에 따른 Clebsh-Gordan 계수들은 그림 1에 표시되어 있다. H. Y. Ling 등⁽¹⁾은 원자가 nonabsorbent 상태(밀도포획상태)에 있거나, absorbent 상태에 있는 것으로 간주하였는데, 이런 가정을 사용하면 결합광이 없어도 원자의 일부분이 밀도 포획상태에 있는 잘 못된 결과를 초래한다. 이점을 개선하기 위하여 본 논문에서는 원자가 가간섭상태와 비가간섭 상태들에 있는 혼합상태의 밀도행렬을 구하였다. 본 에너지 계에서 밀도 포획상태는 다음 4 가지가 가능하다.

$$\begin{aligned}
 |\Psi_{CPT-1}\rangle &= \frac{1}{\sqrt{8}} |2, -2\rangle - \sqrt{\frac{3}{4}} |2, 0\rangle + \frac{1}{\sqrt{8}} |2, 2\rangle \\
 |\Psi_{CPT-2}\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} |2, -1\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}} |2, 1\rangle \\
 |\Psi_{CPT-3}\rangle &= \frac{1}{\sqrt{7}} |2, -2\rangle - \sqrt{\frac{6}{7}} |2, 0\rangle \\
 |\Psi_{CPT-4}\rangle &= -\sqrt{\frac{6}{7}} |2, 0\rangle + \frac{1}{\sqrt{7}} |2, 2\rangle
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서 첫 번째 상태는 잘 알려진 Inverted-W 형이고, 두 번째 밀도포획상태는 Λ 형 상태이다. 세 번째와 네 번째 상태는 Λ 형의 밀도포획상태로, 첫 번째 상태로 가기 전의 상태이며, 본 논문에서 새롭게 추가된 상태들이다.

원자에 거의 공진하는 결합광이 가해지게 되면 원자는 여러 상태의 혼합상태에 있게 된다. 즉 원자에 대한 밀도 행렬은

$$\rho = \sum_{i=1}^4 p_i |\Psi_{CPT-i}\rangle \langle \Psi_{CPT-i}| + \sum_{j=1}^5 p_j |\Psi_j\rangle \langle \Psi_j|
 \tag{2}$$

로 표현할 수 있는데, 첫 번째 합은 밀도포획상태에 있는 원자들에 대한 것이며, 두 번째 합은 비가간섭성 고유 상태에 있는 것들에 대한 것이다. 원자들이 각 상태에 있는 확률은 다음의 밀도행렬 방정식을 풀어 구할 수 있다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{i}{\hbar} [H^{int}, \rho] + \left(\frac{\partial \rho}{\partial t}\right)_{sp} + \left(\frac{\partial \rho}{\partial t}\right)_{col} \quad (3)$$

그림 2는 결합광이 선형편광이고 천이선에 공진할 때, 결합광의 전기장의 크기가 증가함에 따라 원자가 가간섭 상태에 있을 밀도를 나타낸다. 그림 3은 결합광의 세기가 작을 때 Log(밀도포획 상태의 밀도) 대 Log(규격화된 결합광 전기장의 크기)를 나타내는 것으로서 기울기는 각각 2와 4에 가깝다. 이는 Λ 밀도포획상태는 2광자 과정에 의해 형성되고, Inverted-W 형 밀도포획 상태는 4광자 과정에 의해 형성되기 때문이다.

1. H.Y. Ling, Y.-Q. Li, and M. Xiao, Phys. Rev. A53, 1014 (1996).

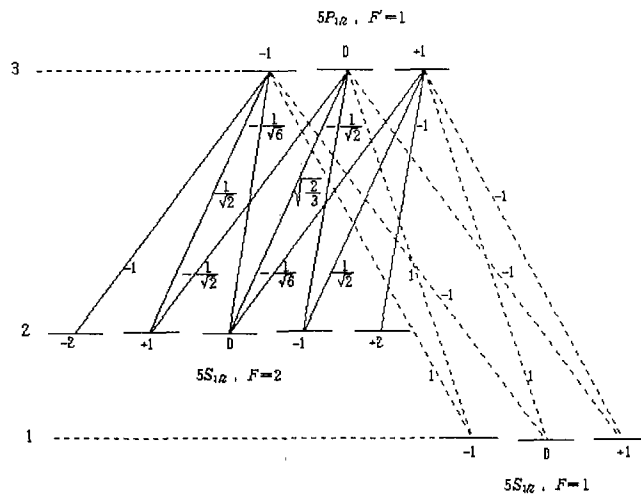


그림 1 루비듦 원자 ^{87}Rb 의 $5^2S_{1/2}, F=1, 2 \rightarrow 5^2P_{1/2}, F'=1$ 사이의 Clebsch-Gordan 계수.

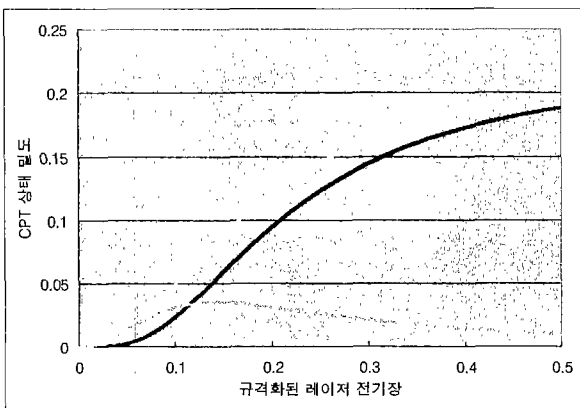


그림 2 결합광 전기장의 크기에 따른 밀도포획 상태의 밀도
(위곡선-p2, 중간 곡선-p1, 아래 곡선- p3, p4)

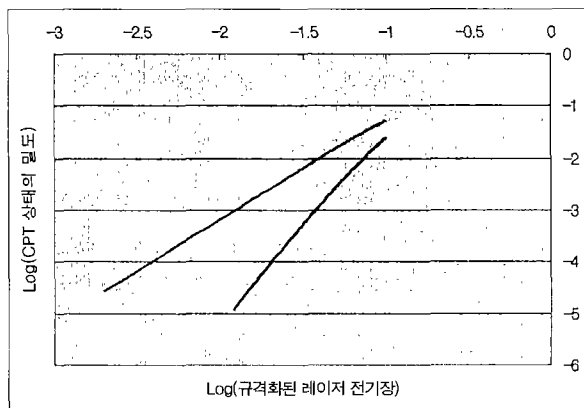


그림 3 결합광 전기장의 크기가 작을 때 밀도포획상태의 밀도, Log-Log 그래프
(위곡선 - p2, 아래 곡선 - p1)

