

원자 결맞음으로 인한 이광자 라만 이득

Two-Photon Raman Gain due to Atomic Coherences

박중대, 조창호, 박상언\*, 이호성\*, 박성중\*\*, 조혁\*\*

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

최근 레이저에 의해 유도된 원자의 결맞음성으로 인한 현상들에 대한 이론적, 실험적 연구가 많이 진행되고 있다. 결맞음 밀도 합정상태의 형성, 전자기 유도 흡수 현상(EIA), 전자기 유도 투과 현상(EIT), 밀도 반전 없는 레이저 발진, 매우 높은 굴절률을 갖는 매질의 형성, Hanle 효과, 레이저 냉각 등은 원자의 결맞음성으로 인한 것들이다. 원자들이 레이저 빔에 의하여 결맞음 상태에 있게 되면 다중광자 과정들이 향상되어 일어날 수 있다.

그림 1 에서와 같이  $\Lambda$ 형 에너지 준위를 가지고 있는 원자가  $v$  의 속도로 + 방향으로 진행하고 있다고 하자. 이 원자의 운동 방향과 같은 방향 및 반대 방향으로 진행하는 경우를 생각해 보자.

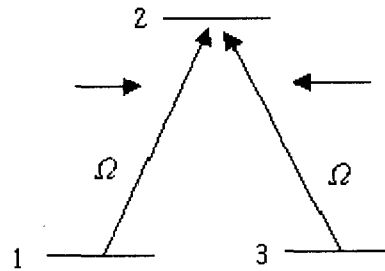


그림 1  $\Lambda$ 형 에너지 준위계

바닥상태가 축퇴된 경우, 그리고 라비주파수가 같은 경우 상호작용 해밀토니안은 다음과 같이 주어진다.

$$H_{int} = \begin{bmatrix} kv & \Omega & 0 \\ \Omega & \delta & \Omega \\ 0 & \Omega & -kv \end{bmatrix} \tag{1}$$

여기서  $\Omega$  는 라비 주파수에 해당하고,  $\delta$  는 주파수 어긋남,  $kv$  는 도플러 효과에 의한 주파수 어긋남이다. 이런 해밀토니안을 사용하여 밀도행렬 방정식을 풀면 원자 상태의 변화를 계산할 수 있다.

$$i\hbar \frac{\partial \rho}{\partial t} = [H_{int}, \rho] + \left( \frac{\partial \rho}{\partial t} \right)_{spont} \tag{2}$$

여기서 빛의 자발 방출에 의한 밀도행렬의 감쇠는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left( \frac{\partial \rho}{\partial t} \right)_{spont} = \frac{1}{2} \Gamma \begin{bmatrix} \rho_{11} & -\rho_{12} & 0 \\ -\rho_{21} & -2\rho_{22} & -\rho_{23} \\ 0 & -\rho_{32} & \rho_{22} \end{bmatrix} \tag{3}$$

여기서  $\Gamma$ 는 자방방출률이다. 식 (2)에 대한 정상상태의 해로부터 구한 밀도 행렬 요소 성분들은 그림 2와 같다. 여기서 사용한 파라미터 값은  $\delta = -2$ ,  $\Gamma = 1$ ,  $\Omega = 0.1$  이다.

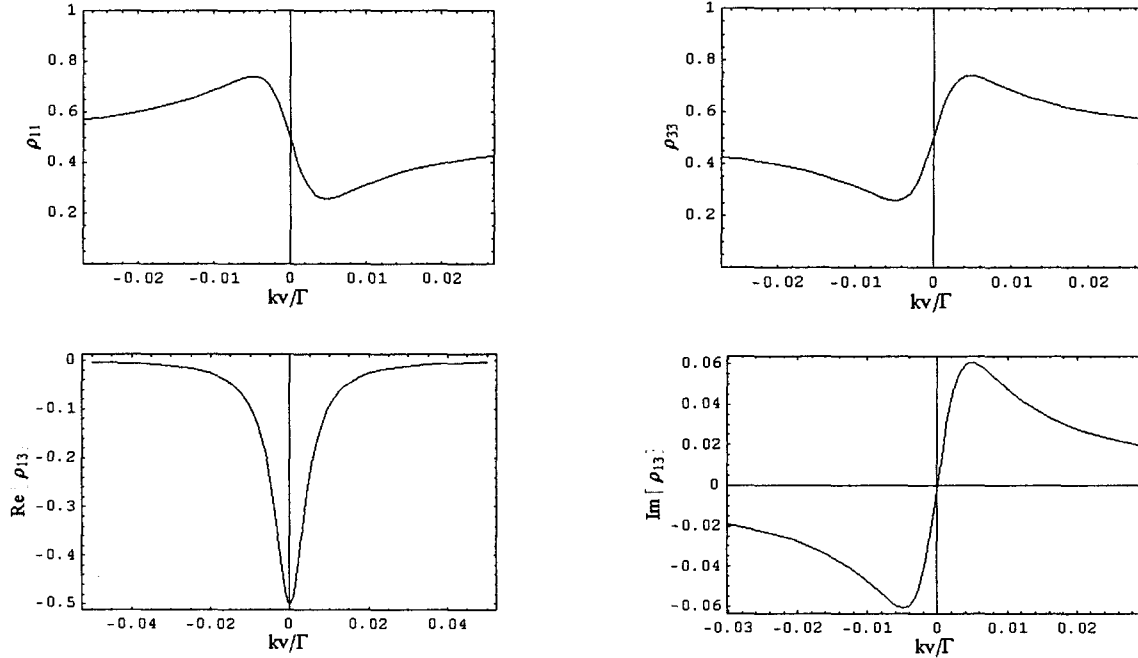


그림 2 계산된 밀도 행렬 요소 성분들

여기서 1상태와 3상태의 밀도가 분산형이 되는 이유를 알아보기 위해, 1상태의 밀도와 3상태의 밀도를  $Im(\rho_{13})$ 의 함수로 나타내면 다음과 같다.

$$\rho_{11} = 0.5 \left[ 1 + \left( 4 \left( \frac{\delta - kv}{\Gamma} \right) - 8 \left( \frac{kv}{\Omega} \right)^2 \frac{\delta}{\Gamma} \right) Im(\rho_{13}) \right]$$

$$\rho_{33} = 0.5 \left[ 1 - \left( 4 \left( \frac{\delta + kv}{\Gamma} \right) - 8 \left( \frac{kv}{\Omega} \right)^2 \frac{\delta}{\Gamma} \right) Im(\rho_{13}) \right]$$

$$\rho_{11} - \rho_{33} = 4 \left( 1 - 2 \left( \frac{kv}{\Omega} \right)^2 \right) \frac{\delta}{\Gamma} Im(\rho_{13}) \quad (4)$$

일반적으로 라비주파수를 실수로 표현하였을때, 결맞음 요소의 허수부분은 흡수 또는 이득을 나타내게 되므로 각 상태의 밀도는 이광자 라만 이득에 의해 영향을 받는다고 생각할 수 있다. 2광자 라만 이득은 레이저 냉각에 사용되는 다중 V형 원자계에서도 존재한다. 또한 분산형의 밀도분포는 레이저 냉각이론에도 나타나 있는데<sup>(1-4)</sup> 본 논문에서 구한 결과와 참고문헌에 나와 있는 힘에 대한 공식을 사용하면 원자들에게 작용하는 힘을 쉽게 계산할 수 있다.

참고문헌

1. S. Chang, T.Y. Kwon, H.S. Lee, and V. Minogin, Phys. Rev. A. 60, 2308 (1999).
2. S. Chang, T.Y. Kwon, H.S. Lee, and V. Minogin, Phys. Rev. A. 60, 3148 (1999).
3. S. Chang, T.Y. Kwon, H.S. Lee, and V. Minogin, Phys. Rev. A. 64, 013404 (2001).
4. S. Chang, T.Y. Kwon, H.S. Lee, and V. Minogin, Phys. Rev. A. 60, 023416 (2001).