

4 준위 에너지계에서 양자결맞음 현상에 대한 분석

Numerical analysis on quantum coherence in a 4-level system

김성훈*, 홍경수, 정문석, 함병승
한국전자통신연구원 양자결맞음통신연구단
kshoon@etri.re.kr

결맞는 두 개의 레이저 즉 결합광과 조사광을 이용하고 라만 공진 조건을 만족할 때, 특별한 조건하에서 조사광의 흡수가 급격히 줄어드는 검은공진(dark resonance)현상이 일어난다. 이러한 현상은 굴절을 변천에 기인하여 밀도반전없는 레이저 등 비선형 광학과 고분해 분광학, 양자광학 등 많은 분야에 응용되고 있다.

일반적으로 여기상태의 에너지준위와 두 개의 기저 에너지 준위를 가지는 3 준위 Λ -type 시스템의 경우, 결합광과 조사광의 레이저 광은 물질상호작용을 통하여 검은공진을 기초로 한 에너지 준위들간의 양자결맞음 상태를 유도하게 된다. 여기서 기저상태의 두 에너지 준위사이에는 이광자(two photon) 양자결맞음 ρ_{12} 이 유도되고, 기저상태와 여기상태의 에너지 준위사이에는 단광자(one photon) 양자결맞음 ρ_{13} 이 유도된다. 여기에 덧붙여 위의 양자결맞음 상태를 조절하기 위해 한 개의 에너지 준위와 한 개의 레이저가 추가된 4준위 시스템의 검은공진 유도 광스위치 모델을 제시한다.

첫 번째는 III-type 4준위 시스템으로 이광자 양자결맞음항 ρ_{12} 을 이용하는 양자스위치(quantum switch)⁽¹⁾ 모델을 그림 1에 보이고 있다. 검은공진에 의한 이광자 결맞음은 모두 3개의 기저상태 에너지 준위의 조합에서 총 3개까지 가능하며 이들 3개의 검은공진은 특정한 조건을 만족할 때, 서로 영향을 주는 결맞음 교환현상을 갖게 된다. 이러한 이광자 결맞음 교환현상을 규명하기 위해 위의 III-type 모델에 대한 Hamiltonian을 식 (1)과 같이 전개하였다.

$$H_{\omega} = -\frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} -2\delta_1 & 0 & 0 & \Omega_1 \\ 0 & -2\delta_2 & 0 & \Omega_2 \\ 0 & 0 & -2\delta_3 & \Omega_3 \\ \Omega_1 & \Omega_2 & \Omega_3 & 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서 대각항인 detuning $\delta_1 = \omega_{14} - \omega_1$, $\delta_2 = \omega_{24} - \omega_2$, $\delta_3 = \omega_{34} - \omega_3$ 이다.

두 번째는 N-type 4준위 시스템으로 검은공진의 직접흡수변화인 전자기 유도 투과(Re ρ_{13})를 직접 이용하는 광양자스위치(photon switch)⁽²⁾ 모델로 그림 2와 같이 두 개의 여기상태와 두 개의 기저상태 에너지 준위, 그에 작용하는 세 개의 레이저광 $\omega_c, \omega_p, \omega_{24}$ 과의 상호작용에 대한 Hamiltonian은 식 (2)와 같이 전개할 수 있다.

$$H_\omega = -\hbar \begin{pmatrix} 0 & 0 & \frac{\Omega_p}{2} & 0 \\ 0 & \Delta\omega_c & \frac{\Omega_c}{2} & \frac{\Omega_{24}}{2} \\ \frac{\Omega_p}{2} & \frac{\Omega_c}{2} & \Delta\omega_p & \Omega_3 \\ 0 & \frac{\Omega_{24}}{2} & 0 & \Delta\omega_{24} \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기서 detuning 항은 $\Delta\omega_{24} = \omega_p - \omega_c + \omega_{24} - (\omega_4 - \omega_1)$ $\Delta\omega_c = \omega_p - \omega_c - (\omega_2 - \omega_1)$, $\Delta\omega_p = \omega_p - (\omega_3 - \omega_1)$ 이다.

본 연구에서는 이러한 두 개의 서로 다른 4준위 에너지 시스템에서 검은공진 유도 양자결맞음을 이용하는 두 모델에 대한 밀도행렬방정식을 전개하여 초고속 광스위치 응용을 위해 수치적으로 서로 비교 분석하였다.

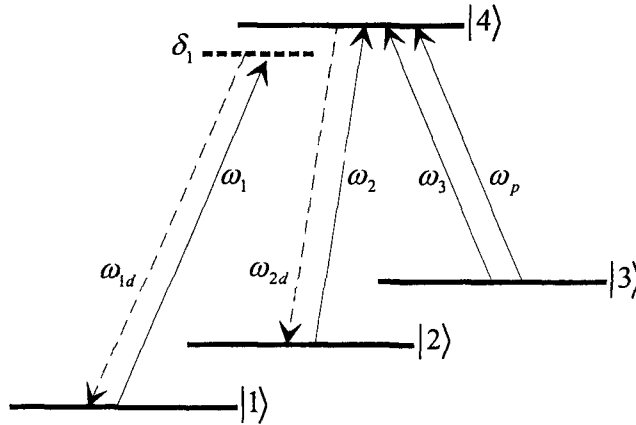


그림 1. 양자스위치를 위한 4준위 에너지 시스템

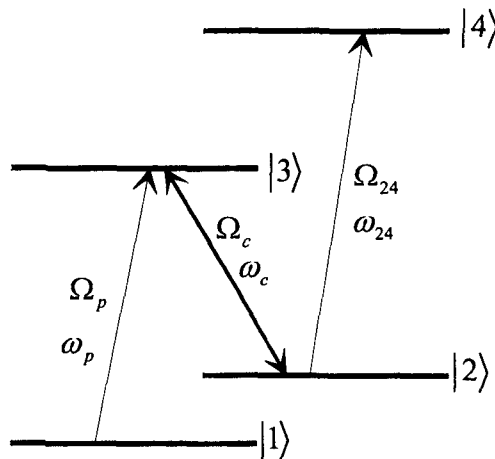


그림 2. 광양자스위치를 위한 4준위 에너지 시스템

참고문헌

- (1) B. S. Ham and P. R. Hemmer, Phys. Rev. Lett. 84, 4080 (2000).
- (2) S. E. Harris and Y. Yamamoto, Phys. Rev. Lett. 81, 3611 (1998).