

3준위 원자계에서 2광자 공진 조건

박종대, 조창호
배재대학교 전산전자물리학과
jdpark@pcu.ac.kr

Two-photon resonance condition in Three level Atomic System

Park, Jong-Dae and Cho, Chang-Ho
Dept. of Computational Electronical Physics, Pai-Chai Univ.

요약

원자와 빛과의 상호작용에 의해 원자에 결맞음이 유도될 수 있는데, 이러한 원자의 결맞음은 새로운 물성 및 광학적 현상을 제공한다. 2광자 공진은 원자의 결맞음 형성에 중요한 역할을 하는데 지금까지 2광자 조건에 대한 근사적인 공식이 사용되어져 왔다. 본 논문에서는 2광자 공진 조건을 정확히 유도하고, 수치적 계산을 통하여 이를 확인하였으며, 주파수 편이 및 빛의 세기에 따른 2광자 공진 조건의 변화를 조사하였다.

Abstract

Atomic coherences induced by the interaction with light provide new physical properties and optical phenomena. Even though two-photon resonances play important roles in build-up of atomic coherences, only approximate formula for two-photon resonance condition has often been used. In this paper, we present the more accurate two-photon resonance condition and confirm it using numerical simulation. We also studied the effects of laser frequency detuning and intensity on the two-photon resonance.

Keywords: Atomic coherence, Two-photon resonance, Laser spectroscopy

I. 서론

최근 3-준위 원자계에서 원자 결맞음에 관련된 현상에 대해 많은 연구가 이루어지고 있다. 전자기 유도 투과, 전자기 유도 흡수, 밀도 반전 없는 레이저 발진, 선폭이 좁은 공진에 의한 큰 굴절률의 실현, 저광속, 초광속, 초저온 원자 냉각 현상들은 원자 결맞음과 관련된 현상들이다. 3준위 원자계는 계단형, V 형, Λ 형으로 분류할 수 있는데, Λ 형의 3준위 원자계는 바닥 상태간의 결맞음이 오래 지속될 수 있으므로 Λ 형의 3준위 원자계가 실질적으로 많이 연구되고 있다(장준성과 이재형 2002). 원자계에서 준위간 결맞음은 단일 광자에 의해 유도될 수도 있고, 다중 광자에 의해 유도될 수도 있다. 3 준위 원자계에서는 2 광자 전이가 상태간 결맞음을 형성하는데 중요한 역할을 한다. 3 준위 원자계에서 효율적인 원자 결맞음을 유도하기 위해서는 2 광자 조건에 맞추어 레이저빔을 조사하는 것이 필요한데, 본 논문에서는 기존에 알려진 2광자 조건보다 정확한 2 광자 조건을 제시하고자 한다. 본 논문의 결과는 결맞음 원자 이송 등에 유용하게 이용될 수 있다.

II. 이론

3 준위계에서 2광자 공진 조건을 구하기 위하여 3 준위 원자계를 2 준위 원자계로 근사시켜 2 광자 detuning 효과를 연구하는 과정에서 얻을 수 있다. 3준위를 2 준위로 근사시키기 위해서는 나머지 한 준위의 효과가 무시될 수 있어야 하는데, 단일 광자에 의해 그 준위로의 밀도가 거의 이송되지 않는 경우에 가능하다. 예를 들면 Λ 형 원자계에서 단일 광자 공진이 되지 경우에 여기상태의 밀도가 아주 작아서 여기상태를 무시할 수 있는 경우, 3준위 원자계를 2 준위 원자계로 근사할 수 있다. 이렇게 되면 한 상태에서 다른 상태로의 2광자 천이만 고려하는 것을 의미하는데 유효 전기장으로 2광자 천이를 기술하게 된다. 지금까지 detuning 이 선폭에 비해 작은 경우(Hemmer et al, 1986)와 선폭에 비해 큰 경우(Moler et al, 1992) 근사가 사용되어 왔다. 본 논문에서는 보다 정확한 근사를 얻기 위하여, 원자의 상태를 기술하는 밀도 행렬 방정식들을 가능한 변하지 않도록 근사를 수행하였다.

그림 1 에서와 같이 Λ 형 에너지 준위를 가지고 있는 원자가 라비 주파수가 Ω_1, Ω_2 인 레이저빔 과 상호작용을 하고 있다고 하고, 여기준위의 밀도 감쇠율(2γ)에 규격화된 detuning 을 δ_1, δ_2 라고 하자.

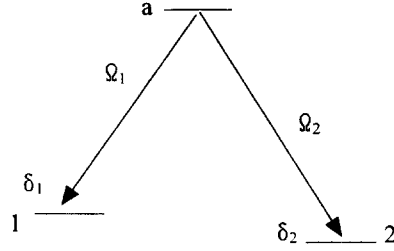


그림 1 A형 에너지 준위계

이런 원자계의 해밀토니안은 $|a\rangle$, $|1\rangle$, $|2\rangle$ 상태 벡터로 구성된 힐버트 공간에서 다음과 같이 기술된다.

$$H_3 = \begin{bmatrix} 0 & -\Omega_1 & -\Omega_2 \\ -\Omega_1 & 0 & 0 \\ -\Omega_2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

주파수 detuning과 자발 방출과 바닥상태간의 충돌 등의 결맞음성 감소(γ_{12})에 의한 밀도행렬의 변화는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \right)_{decay} = \begin{bmatrix} -2\gamma_{aa} & -(\gamma - i\delta_1)\rho_{a1} & -(\gamma - i\delta_2)\rho_{a2} \\ -(\gamma + i\delta_1)\rho_{1a} & \gamma\rho_{aa} & -(\gamma_{12} - i(\delta_2 - \delta_1))\rho_{12} \\ -(\gamma + i\delta_2)\rho_{2a} & -(\gamma_{12} + i(\delta_2 - \delta_1))\rho_{21} & \gamma\rho_{aa} \end{bmatrix} \quad (2)$$

밀도행렬성분의 변화는 다음 방정식을 풀어 알아낼 수 있다.

$$i\eta \frac{\partial \rho}{\partial t} = H_3 \rho - \rho H_3 + i\eta \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \right)_{decay} \quad (3)$$

식(1)-(3)로 기술되는 밀도행렬 방정식은 다음 해밀토니안과 감소성분을 사용하여도 얻을 수 있다.

$$H_3 = \begin{bmatrix} 0 & -\Omega_1 & -\Omega_2 \\ -\Omega_1 & \delta_1 & 0 \\ -\Omega_2 & 0 & \delta_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial t}\right)_{decay} = \begin{bmatrix} -2\gamma\rho_{aa} & -\gamma\rho_{a1} & -\gamma\rho_{a2} \\ -\gamma\rho_{1a} & \gamma\rho_{aa} & -\gamma_{12}\rho_{12} \\ -\gamma\rho_{2a} & -\gamma_{12}\rho_{21} & \gamma\rho_{aa} \end{bmatrix} \quad (5)$$

식(1)-(3)으로 기술되는 3준위 원자계를 여기상태를 제외한 2 준위 원자계로 근사하였을 때 올바른 근사가 될려면 행렬 요소 성분에 관한 방정식은 불변해야 한다. 실제적으로 여기상태로의 천이 때문에 근사된 2준위계의 해밀토니안은 Hermitian 이 될 필요는 없다. 2준위 원자계로 근사한 해밀토니안은

$$H_2 = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{i\Omega_1\Omega_2}{\gamma - i\delta_2} \\ -\frac{i\Omega_1\Omega_2}{\gamma - i\delta_1} & 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

이고, 밀도행렬 방정식 및 밀도행렬 요소의 감쇠를 나타내는 행렬은 다음과 같다.

$$i\eta \frac{\partial \rho}{\partial t} = H_2\rho - \rho H_2^\dagger + i\eta \left(\frac{\partial \rho}{\partial t}\right)_{decay}, \quad \left(\frac{\partial \rho}{\partial t}\right)_{decay} = \begin{pmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} \end{pmatrix} \quad (7)$$

여기서

$$\lambda_{12} = (\gamma_{12} + i(\delta_1 - \delta_2)) + \frac{\Omega_1^2}{\gamma - i\delta_2} + \frac{\Omega_2^2}{\gamma + i\delta_1} \rho_{12}, \quad \lambda_{21} = \lambda_{12}^\dagger \quad (8)$$

이다.

$$\lambda_{11} = -\frac{\gamma\Omega_1^2}{\gamma^2 + \delta_1^2} \rho_{11} + \frac{\gamma\Omega_2^2}{\gamma^2 + \delta_2^2} \rho_{22} + \frac{(-i(\rho_{12} - \rho_{21})(\delta_1 - \delta_2)(-\gamma^2 + \delta_1\delta_2) + (\rho_{12} + \rho_{21})\gamma(2\gamma^2 + 3\delta_1^2 - \delta_2^2))\Omega_1\Omega_2}{2(\gamma^2 + \delta_1^2)(\gamma^2 + \delta_2^2)} \quad (9)$$

$$\lambda_{22} = \frac{\gamma\Omega_1^2}{\gamma^2 + \delta_1^2} \rho_{11} - \frac{\gamma\Omega_2^2}{\gamma^2 + \delta_2^2} \rho_{22} + \frac{(-i(\rho_{12} - \rho_{21})(\delta_1 - \delta_2)(-\gamma^2 + \delta_1\delta_2) + (\rho_{12} + \rho_{21})\gamma(2\gamma^2 - \delta_1^2 + 3\delta_2^2))\Omega_1\Omega_2}{2(\gamma^2 + \delta_1^2)(\gamma^2 + \delta_2^2)} \quad (10)$$

따라서 3 준위계를 2 준위계로의 근사할 때는 유효 2 준위 해밀토니안과 함께, 대각행렬 성분에 대한 영향도 고려해 주어야 한다. 밀도 행렬 요소의 대각성분의 시간에 대한 변화는 다음 식으로 기술된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_{11}}{\partial t} &= -\frac{\gamma \Omega_1^2}{\gamma^2 + \delta_1^2} \rho_{11} + \frac{\gamma \Omega_2^2}{\gamma^2 + \delta_2^2} \rho_{22} \\ &\quad - \frac{(\delta_1 + \delta_2)((\rho_{12} + \rho_{21})\gamma(-\delta_1 + \delta_2) - i(\rho_{12} - \rho_{21})(\gamma^2 + \delta_1 \delta_2))\Omega_1 \Omega_2}{2(\gamma^2 + \delta_1^2)(\gamma^2 + \delta_2^2)} \\ \frac{\partial \rho_{22}}{\partial t} &= -\frac{\partial \rho_{11}}{\partial t} \end{aligned} \quad (11)$$

정상상태에서 ρ_{12}, ρ_{21} 은

$$\rho_{12} = -\frac{\frac{\rho_{11}}{\gamma + i\delta_1} + \frac{\rho_{22}}{\gamma - i\delta_2}}{\gamma_{12} + i(\delta_1 - \delta_2) + \frac{\Omega_1^2}{\gamma - i\delta_2} + \frac{\Omega_2^2}{\gamma + i\delta_1}} \Omega_1 \Omega_2, \quad \rho_{21} = \rho_{12}^\dagger \quad (12)$$

이다. 정상상태의 경우 밀도 성분은 식 (11)에서 시간에 대한 미분을 0으로 놓은 후 식(12)를 대입하여 ρ_{11} 과 ρ_{22} 사이의 관계식을 얻은 후, $\rho_{11} + \rho_{22} = 1$ 과 함께 풀면 구할 수 있다.

식 (11)에서 우변의 처음 두 항은 자발 방출에 의해 밀도의 재분포를 기술하고, 세번째 항은 라만천이 등 2 광자에 의한 밀도의 재분포 효과를 나타낸다.

식(12)에서 분모의 허수 부분이 0이 되는 조건은 다음과 같이 되는데

$$\delta_2 = \delta_1 + \frac{\delta_2 \Omega_1^2}{\gamma^2 + \delta_2^2} - \frac{\delta_1 \Omega_2^2}{\gamma^2 + \delta_1^2} \quad (13)$$

이 조건이 2 광자 공진이 된다.

III. 기존 결과와 비교 및 논의

기존논문들에서 사용되는 2 광자 공진 조건은 $\delta_1 = \delta_2$, 혹은 $\delta_1 + \frac{\Omega_1^2}{\delta_1} = \delta_2 + \frac{\Omega_2^2}{\delta_2}$ 이다.

본 논문에서 얻은 공진 조건이 매우 정확한 근사임을 확인하기 위하여 원래 방정식을 사용하여 주파수 detuning에 따른 결맞음 성분의 변화를 계산하여 공진의 위치를 확인한 후 이를 비교하여 보았다. 그림 2는 $\delta_1 = 5$, $\Omega_1 = 1.0$, $\Omega_2 = 0.01$ 일 때 상태 1,2간의 결맞음 성분의 허수 부분을 보여 준다. 기존의 공진은 $\delta_2 = 5.2$ 에서 일어나고 본 논문에서 제시한 공식을 사용하면 $\delta_2 = 5.192$ 로 수치적 계산의 피크위치와 일치함을 알 수 있다.

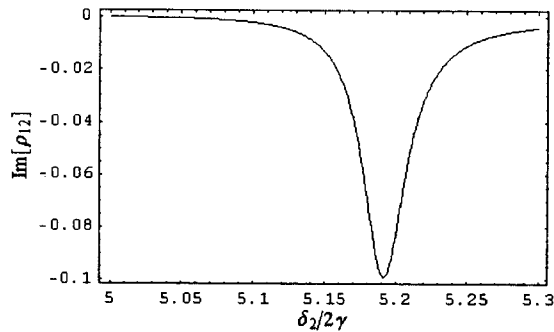
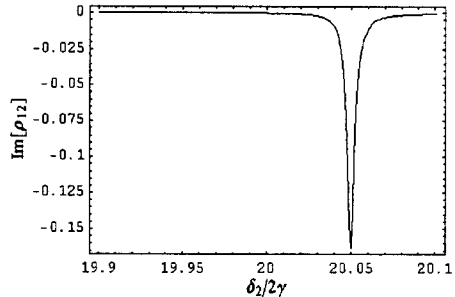
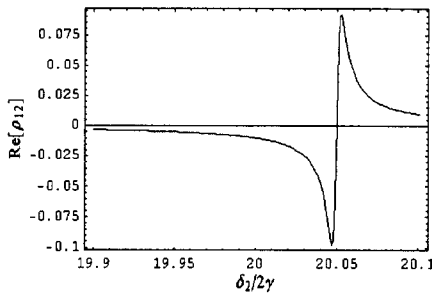
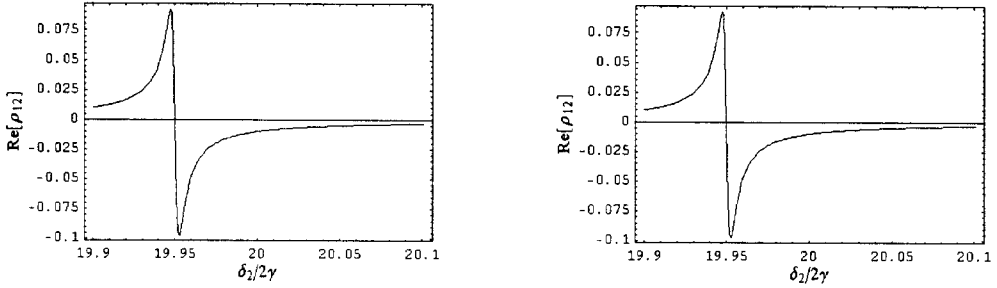


그림 2 주파수 detuning에 따른 결맞음 성분의 변화

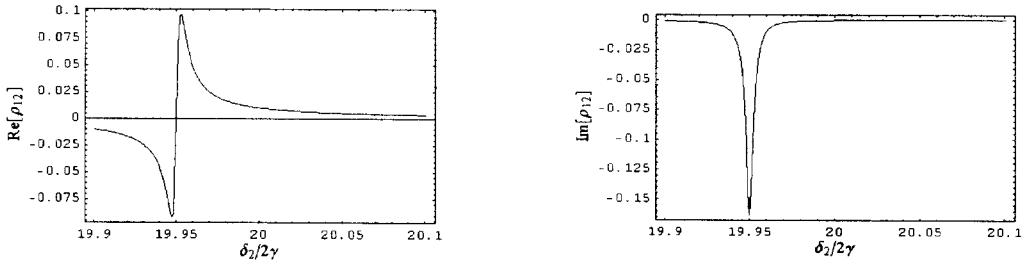
식 (13)에 의하면 공진 조건은 가해진 레이저의 세기 및 detuning 에 따라 달라짐을 알 수 있다. 이는 그림 (3)에서 확인 할 수 있다. 그림 3은 여러 가지 경우에 있어서 ρ_{12} 의 실수 부분과 허수부분을 보여준다.



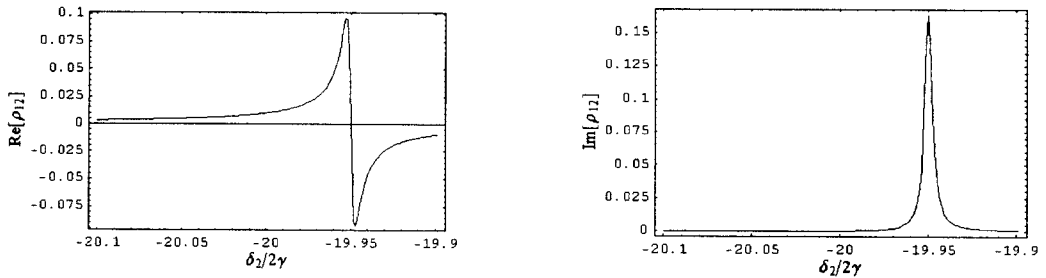
(a) $\Omega_1 = 1.0, \Omega_2 = 0.01, \delta_1 = 20$



(b) $\Omega_1 = 0.01, \Omega_2 = 1.0, \delta_1 = 20$



(c) $\Omega_1 = -0.01, \Omega_2 = 1.0, \delta_1 = 20$



(d) $\Omega_1 = -0.01, \Omega_2 = 1.0, \delta_1 = -20$

그림 3 여러 경우 바닥상태간의 밀도 행렬 요소 ρ_{12} .

IV. 결 론

3 준위계에서 2 광자 공진 조건을 구하였다. 이 조건은 3준위 원자계를 2 준위계로 근사하는 과정에서 얻어 졌는데, 수치적 계산과 정확히 일치하는 결과를 얻었다. 2광자 공진은 천이에 관련하는 레이저 빔의 세기 및 detuning에 따라 달라짐을 알 수 있었고, 본 논문의 결과는 기존 결과보다 정확한 것이다.

V. 감사의 글

본 연구는 배재대학교 1999년도 교내 학술 연구비의 지원을 받아 수행되었습니다.

VI. 참 고 문 헌

- 장준성, 이재형 편저, 2002, '레이저 분광학의 응용', 테크미디어, 서울.
Hemmer, P. R., Ontai, G. P., and Ezekiel, S. 1986, *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 3, 219.
Moler, K., Weiss, D. S. Kasevich, M., and Chu, S. 1992, *Phys. Rev. A.*, vol. 45, 342.

본 논문에 사용된 라비 주파수는 $\mu E/2\hbar$ 이고, 여기준위의 밀도 감쇠율(2γ)에 규격화되었음.