

두 선형 편광 레이저에 의해 유도된 루비듐-87 원자에서의 가간섭성

Atomic Coherences in ^{87}Rb Atoms Induced by Two Linearly Polarized Lasers

황성태, 박종대, 박성중*, 조혁*, 이호성**

배재대학교 물리학과, *충남대학교 물리학과, **한국표준과학연구원

jdpark@woonam.paichai.ac.kr

레이저에 의해 원자상태의 바닥상태들이 가간섭적인 상태에 있을 수 있는데, 이로 인하여 가간섭 밀도 함정 상태(Coherent Population Trapped State)^(1,2), 전자기 유도 투과 (Electromagnetic Induced Transparency) 현상, 밀도 반전 없이 가간섭성에 의한 레이저 발진(Laser without Population Inversion)⁽³⁾ 등이 가능해진다. 최근 알칼리 원자에 자기장을 가하여 바닥상태의 축퇴를 없애고, 레이저를 사용하여 원자 가간섭성을 만들어서 표준 시계를 위한 마이크로파 신호를 얻는 연구가 행해지고 있는데^(4,5), 이에 대한 이론적 설명은 간단한 3 준위계에 관한 것만 발표되어 있다. 만일 자기장이 없거나 미약할 경우, 바닥 상태들은 서로 결합하여 다른 현상을 보여줄 수 있다. 본 논문에서는 루비듐-87원자에 두 개의 바닥 준위(F=1, F=2)와 한 여기준위 (F'=1) 에 두 개의 선형 편광된 빔을 입사하였을 경우 유도되는 원자의 가간섭성을 계산하였다. 1개의 선형 편광된 빔은 σ^+ , σ^- 편광의 두 빔으로 분해 할 수 있으므로, 원자와 상호 작용하는 빔의 수는 4개가 된다. 지금까지 발표된 연구 결과들은 σ^+ , σ^- 편광된 두 빔에 의해, F=2 인 상태에서 밀도 함정 상태와 전자기 유도 투과 현상에 대한 것이지만, 본 연구는 F=1 인 상태가 포함되었을 경우, 밀도 함정 상태가 어떻게 구성되는가를 조사하였다. 본 연구에서 사용된 에너지 준위와 천이 확률 진폭은 그림 1과 같으며, 레이저에 의해 만들어지는 밀도 함정 상태는 3개로, Inverted-W 형 두 개와 이중 Λ 형 한 개로 구성된다. 구체적으로는

$$\begin{aligned} |\Psi_{NC,1}\rangle &= \frac{1}{\sqrt{8}} |2, -2\rangle - \frac{\sqrt{3}}{2} |2, 0\rangle + \frac{1}{\sqrt{8}} |2, 2\rangle \\ |\Psi_{NC,2}\rangle &= -\frac{1}{\sqrt{3}} |2, -2\rangle + \frac{1}{\sqrt{3}} |1, 0\rangle + \frac{1}{\sqrt{3}} |2, 2\rangle \\ |\Psi_{NC,3}\rangle &= -\frac{1}{2} |2, -1\rangle + \frac{1}{2} |2, 1\rangle + \frac{1}{2} |1, -1\rangle + \frac{1}{2} |1, 1\rangle \end{aligned} \quad (1)$$

이다.

여러 번의 자발 방출과 충돌 과정을 거치게 되면, 원자는 밀도 함정 상태의 혼합 상태에 있게 된다. 이를 밀도 행렬로 나타내면

$$\rho = \sum_{i=1}^3 P_{\psi_i} |\Psi_{NC,i}\rangle \langle \Psi_{NC,i}| \quad (2)$$

로 표현할 수 있다. 여기서 P_{ψ_i} 는 각 트랩된 상태의 밀도로 자발방출률, 충돌률에 의해 결정된다.

원자의 가간섭성을 계산하기 위하여 밀도행렬 방정식을 세우고 이를 매쓰매티카 프로그램을 사용하여 계산하였다. 밀도 행렬 방정식에는 원자와 레이저 빛과의 상호 작용, 자발 방출, 충돌 등이 포함되었다. F=2 인 상태는 $|2, -2\rangle$, $|2, -1\rangle$, $|2, 0\rangle$, $|2, 1\rangle$, $|2, 2\rangle$ 의 지만 부준위로 구성되어 있고, F=1 인 상태는 $|1, -1\rangle$, $|1, 0\rangle$, $|1, 1\rangle$ 의 지만 부준위 상태로 되어 있으며, F'=1 인 여기 상태도 $|1', -1\rangle$, $|1', 0\rangle$, $|1', 1\rangle$ 상태로 되어 있으므로 밀도 행렬 요소의 수는 121개이다. 이중 대각 행렬 요소의 수는 11개이고, 독립적인 비대각 요소의 수는 55 이다. 대각 행렬 요

소들은 실수이며, 비대각 행렬 요소들은 복소수이므로 총 변수는 121개가 된다. 그림 2는 계산된 원자의 가간섭성을 보여 준다. 기호를 간단히 하기 위해서 $F=2$ 바닥상태는 위의 순서대로 $|1\rangle, |2\rangle, \dots, |5\rangle$, $F=1$ 인 바닥상태는 $|6\rangle, |7\rangle, |8\rangle$, 여기상태는 $|a\rangle, |b\rangle, |c\rangle$ 로 나타내었다. 시계 천이선으로 사용될 수 있는 에너지 준위는 $|2,0\rangle$ 과 $|1,0\rangle$ 인데, 이들 사이의 가간섭성은 계산 결과 0 이었는데, 이는 두 바닥상태 $|2,0\rangle, |1,0\rangle$ 는 시계에 사용될 수 없고, 자기장 등에 의해 에너지 준위를 분리하여 $|2,0\rangle, |1',0\rangle, |1,0\rangle$ 상태들만 선택하여 밀도 합정 상태를 만드는 것이 필요하다는 것을 의미한다. 만일 역으로 $|2,0\rangle$ 과 $|1,0\rangle$ 등에 공진하는 마이크로파를 걸어 주게 되면 독립적인 밀도 합정 상태간에 가간섭성을 유도할 수 있을 것이며, 바닥상태는 하나의 가간섭 상태에 있을 수 있을 것으로 예측된다.

참고 문헌

1. H.Y. Ling, Y.-Q. Li, and M. Xiao, Phys. Rev. A53, 1014 (1996).
2. J. W. Jun and H. S. Lee, Optics Commun., 149, 43 (1998).
3. J. Mompert, R. Corbalan, R. Vilaseca, Optics Commun., 147, 299(1998).
4. J. Vanier, A. Godone, and F. Levi, Phys. Rev. A, 2345 (1998).
5. A. Godone, F. Levi, and J. Vanier, Phys. Rev. A, R12, (1999).

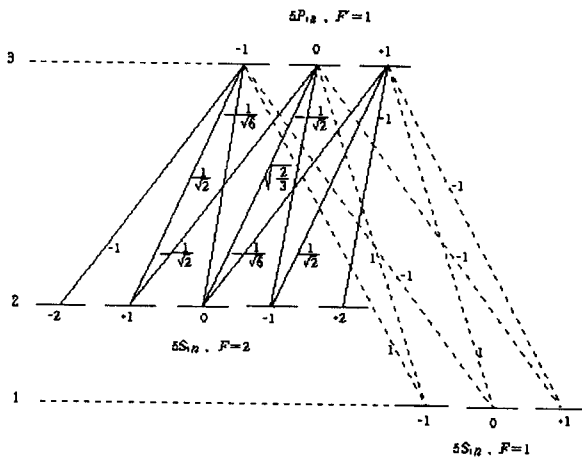


그림 1. 루비듐 87원자의 바닥 준위($F=1, F=2$)와 여기준위 ($F'=1$) 및 천이확률 진폭

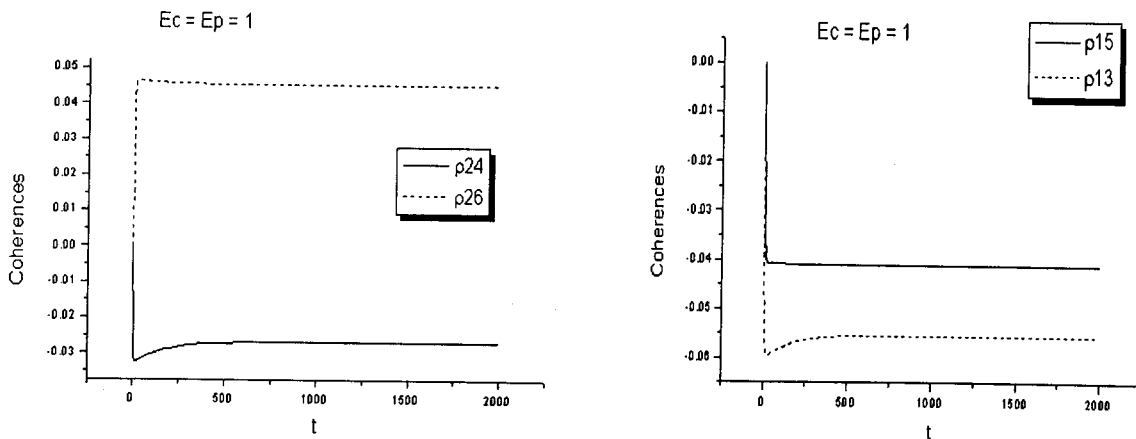


그림 2 계산된 원자의 가간섭성