

# 결맞음 원자계에서 빛의 전파 및 비선형 광학 시뮬레이션

## Beam Propagation and Nonlinear Optics Simulation in Coherently Prepared Atomic Media

박종대, 조창호, 박성중\*, 조혁\*, 권택용\*\*, 이호성\*\*

배재대학교 자연과학부, \*충남대학교 물리학과, \*\*한국표준과학연구원 시간주파수실

e-mail: jdpark@pcu.ac.kr

원자와 빛과의 상호 작용의 결과로 원자에 결맞음이 유도될 수 있는데<sup>(1)</sup>, 결맞음이 오래 지속될 수 있는 경우, 원자의 결맞음은 빛의 전파 및 비선형 광학 현상에 영향을 미친다. 느린 빛, 빠른 빛의 발생, 빛의 저장 및 재생, 낮은 출력을 이용한 합주파수 발생 및 4광파 혼합, 얇은 풀 펄스의 발생 등은 빛이 결맞은 원자를 지나갈 때 나타날 수 있는 현상들이다. 빛과 원자와의 상호 작용은 슈뢰딩거 방정식이나 밀도 행렬 방정식을 풀어 기술할 수 있고, 빛의 전파는 맥스웰 방정식을 풀어 기술할 수 있으므로 결맞은 매질에서 빛의 전파를 이론적으로 연구하기 위해서는 두 방정식을 결합하여 해를 구해야 한다. 빛의 전파에 관한 시뮬레이션은 결맞음 밀도 이송, 맞춤식 원자 결맞음 상태의 형성, Qubit 조작, 양자 스위칭 등의 연구 등에도 이용될 수 있다.

본 연구에서 빛의 전파를 연구하기 위해 선택한 원자계는 그림 1과 같은 삼발이(TRIPOD) 원자계이다<sup>(2)</sup>. 여기상태를  $|3\rangle$ , 바닥상태를  $|0\rangle$ ,  $|1\rangle$ ,  $|2\rangle$  라 하고, 천이에 관련하는 라비 주파수를  $\Omega_n(\zeta, \tau) = -\vec{\mu}_{n3} \cdot \hat{\epsilon}_n E_n f_n(\zeta, \tau)$ ,  $n=0,1,2$  라 하면 ( $\hbar=1$ ) 이 계에 대한 상호작용 해밀토니안은 다음과 같다.

$$H = \Omega_0 e^{-i\delta_0 t - ik_0 z} |0\rangle\langle 3| + \Omega_1 e^{-i\delta_1 t - ik_1 z} |1\rangle\langle 3| + \Omega_2 e^{-i\delta_2 t - ik_2 z} |2\rangle\langle 3| + H.c. \quad (1)$$

레이저 디튜닝은  $\delta_n = \omega_{3n} - \omega_n$  이고,  $\vec{\mu}_{n3}$  와  $\omega_{3n}$  은 각각 쌍극자 모멘트와  $|n\rangle - |3\rangle$  간 천이 각주파수 이다. 원자와 상호 작용하는 전기장은 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$\vec{E}(z, t) = \sum_{n=0}^2 \hat{\epsilon}_n [E_n f_n(z, t) e^{i(\omega_n t - k_n z)} + c.c.] \quad (2)$$

원자의 상태 벡터는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$|\psi(z, t)\rangle = b_0(z, t)|0\rangle + b_1(z, t)e^{i(\delta_0 - \delta_1)t + i(k_0 - k_1)z}|1\rangle + b_2(z, t)e^{i(\delta_0 - \delta_2)t + i(k_0 - k_2)z}|2\rangle + b_3(z, t)e^{i(\delta_0 - \delta_3)t + i(k_0 - k_3)z}|3\rangle \quad (3)$$

맥스웰 파동 방정식에서 slowly varying envelope 근사를 사용하고,  $\tau = t - z/c$  및  $\zeta = z$  를 사용하면 근사된 맥스웰 파동 방정식과 슈뢰딩거 방정식은 다음과 같다.

$$i \frac{\partial}{\partial \tau} \vec{b}(\zeta, \tau) = H(\zeta, \tau) \vec{b}(\zeta, \tau), \quad \frac{\partial}{\partial \zeta} \Omega_n(\zeta, \tau) = i a_n b_n(\zeta, \tau) b_n^*(\zeta, \tau), \quad n=0,1,2. \quad (4)$$

가 된다. 여기서  $a_n = 2\pi M |\vec{\mu}_{n3}|^2 \omega_n / c$  으로 전파 상수에 해당한다.

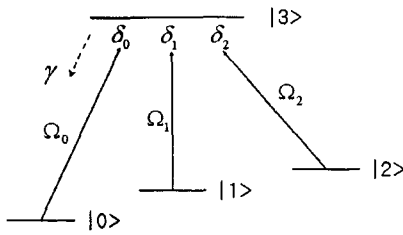


그림 1. 삼발이형 에너지 구조

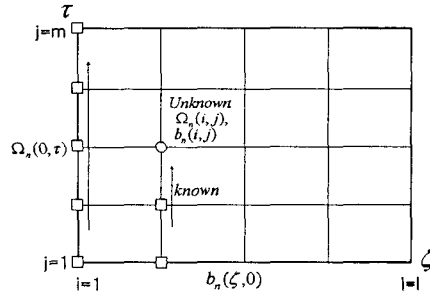


그림 2. 계산을 위한 격자

식 (4)는 비교적 안정적인 Crank-Nicholson 알고리즘을 사용하여 풀 수 있다. Crank-Nicholson 알고리즘의 개념은 오일러 알고리즘이나 Runge-Kutta 알고리즘에서처럼 알고 있는 값으로부터 다음 값을 직접 구하는 것이 아니라, 구하고자 하는 값을 미지수로 놓고, forward-backward 균형화된 식을 사용하여, 미지수를 구하는 것이다. 그림 2에서 사각형으로 표시된 점들에서 값들을 알고 원으로 표시된 점의 값을 구하고자 할 때, 식 (4)를 근사하여 다음 식을 만들어 사용할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 b(i, j) - b(i, j-1) &= -iH(i, j) \cdot b(i, j)dt/2 - iH(i, j-1) \cdot b(i, j-1)dt/2 \\
 \Omega_n(i, j) - \Omega_n(i-1, j) &= ia_n b_n(i, j)b_3^*(i, j)dz/2 + ia_n b_n(i-1, j)b_3^*(i-1, j)dz/2
 \end{aligned} \quad (5)$$

그림 (3)은 삼발이형 원자계에서 원자의 결맞음으로 인하여 비선형 광학적 현상으로 새로운 파동이 생성될 수 있음을 보여준다. 그림 3(a)는  $\delta_2=0$  일 때로서 얇은 펄스가 생성됨을 볼 수 있고, 그림 3(b)는  $\delta_2=\delta=1$  일 때로서 얇지 않은 펄스가 발생됨을 알 수 있다.

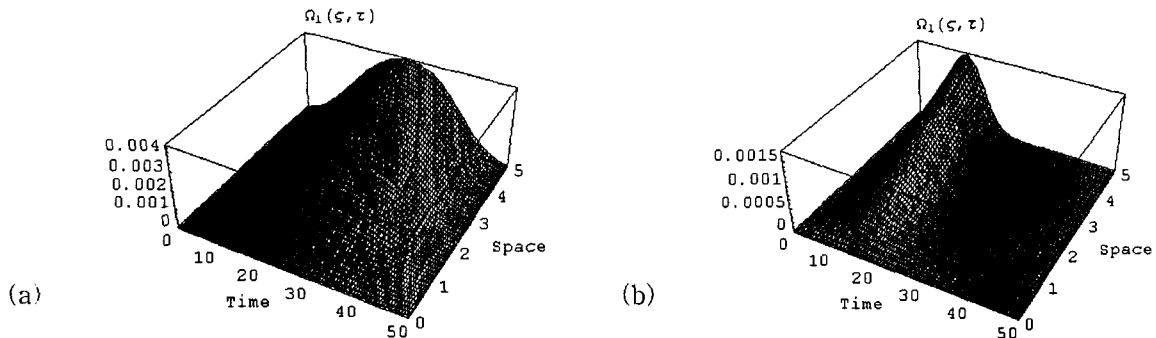


그림 3. 삼발이형 원자계에서 원자의 결맞음으로 인한 새로운 파동의 형성.

입력 펄스:  $\Omega_0(0, \tau) = \Omega_0 \sin^2(\tau\pi/\tau_p)$ ,  $\Omega_0(0, \tau) = 0$ ,  $\Omega_2(0, \tau) = \Omega_2 \sin^2(\tau\pi/\tau_p)$ ,  
 초기원자상태:  $|\psi(\zeta, 0) \geq 1/\sqrt{2}(|0\rangle + |1\rangle)$ , 기타:  $\Omega_1 = 0.1$ ,  $\Omega_2 = 5$ ,  $\delta_0 = \delta_1 = 1$ ,  
 $\tau_p = 50$ ,  $a_0 = a_1 = a_2 = 1$ . (a)  $\delta_2 = 0$ , (b)  $\delta_2 = 1$ .

1. 장준성, 이재형 편저, "레이저 분광학의 응용", Part 1, 테크미디어, (2002).
2. E. Paspalakis, N. J. Kylstra, and P. L. Knight, Phys. Rev. A. 65, 053808 (2002).