

플라즈몬도파관과 결합된 두 양자점들의 얽힘에 미치는 립자간결합효과의 영향

고명철, 김남철

최근 플라즈몬의 특성에 기초한 나노척도에서의 빛조종은 양자암호, 양자원격전송, 양자계산과 같은 양자정보과학에서 중요한 역할을 한다.[1] 그러나 필수적인 단일포톤의 비선형성이 일반적으로 아주 약하기때문에 실제적인 실현은 아직 어렵다. 양자방출기와 단일포톤사이의 강한 결합을 실현하기 위한 이론적 및 실험적연구들[2, 3]에서는 플라즈몬도파관가까이에 놓여있는 양자방출기를 리용하여 큐비트들과 전자기마당과의 호상작용을 리용하였다. 광학과장이하의 반경을 가지는 플라즈몬도파관은 단일포톤(단일플라즈몬)에 대하여 좋은 속박과 전도성을 나타낸다. 플라즈몬도파관에 기초한 단일플라즈몬수송[4]과 양자얽힘[5]의 조종방법은 단일양자론리문을 설계할수 있는 가능성을 주었다. 단일플라즈몬수송과 두 큐비트들사이의 얽힘을 연구하기 위하여 단일모드나 불련속모드들의 집단을 가지는 광학공진기[6]와 련속모드를 가지는 도파관[8]모형들을 리용하였다. 최근에 플라즈몬도파관을 리용한 실공간방법으로 단일플라즈몬수송[4]이나 양자얽힘[5]을 이론적으로 고찰하였다. 결과 플라즈몬도파관과 결합된 양자점들을 가진 계들에 대하여 높은 자발방출률이 실현된다는것이 밝혀졌다. 하지만 양자방출기들이 꼭같고 양자방출기들사이의 호상작용을 무시하는 경우에 대하여서만 보았다. 양자방출기들사이의 호상작용을 고려하는 것은 주개량자점으로부터 받개량자점으로의 회수터에네르기수송과도 관련되므로 단일플라즈몬수송뿐아니라 양자얽힘의 발생에서도 중요한 문제로 된다.

우리는 립자간결합효과를 고려하면서 실공간방법을 리용하여 동시발생성을 가지고 두 양자점들사이의 얽힘을 이론적으로 고찰하였다.

1. 이론적모형과 동력학적방정식

그림 1에서와 같이 연구하려는 계는 립자간결합효과를 가지는 2개의 양자점과 플라즈몬도파관으로 구성되는데 여기서 려기상태 $|e\rangle$ 와 바닥상태 $|g\rangle$ 를 가지는 두 양자점들사이의 거리는 d 이고 그것들은 직경이 D 인 원기둥모양의 플라즈몬도파관근방에 놓여있다. 계는 SiO_2 과 같은 유전체매질속에 매몰되어있다. 령근방모드들을 가진 전파하는 단일플라즈몬의 차단파장은 플라즈몬도파관의 반경을 변화시켜 조종할수 있는데 여기서 그것의 군속도는 어떤 일정한 직경을 가진 도파관에서 모드들에 따라 달라진다. 실례로 령모드들을 가지는 단일플라즈몬은 도파관의 직경이 100nm로부터 150nm로 변화될 때 보임빛 685nm로

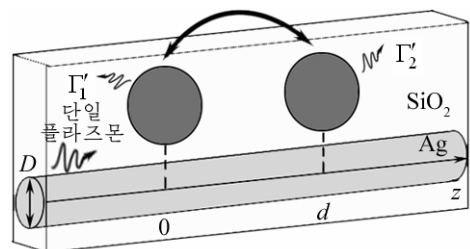


그림 1. 두 양자점들과 결합된 플라즈몬도파관의 모형

부터 근적외선 920nm까지의 파장을 가지고 전파할수 있다. 또한 직경이 110nm인 플라즈몬도파관의 차단파장근방에서 령근방모드를 $n=0.022, 0.962$ 에 대응하는 군속도는 각각 $0.82 \times 10^7, 9.55 \times 10^7 \text{m/s}$ 이다.

실공간방법을 리용하여 전파하는 단일플라즈몬과 호상작용하는 두 량자점들의 얹힘을 동시발생성 C 에 의하여 정량적으로 고찰할수 있다.[7]

회전파근사를 리용하여 실공간에서 계의 해밀터니안은 다음과 같이 주어진다.[4]

$$H/\hbar = iv_g \int_{-\infty}^{\infty} dz [a_l^+(z) \partial_z a_l(z) - a_r^+(z) \partial_z a_r(z)] + \sum_{j=1}^2 (\Omega_j - i\Gamma'_j/2) \sigma_j^+ \sigma_j + \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 f_{ji} \sigma_j^+ \sigma_i + \sum_{j=1}^2 g_j \{ [a_r^+(z_j) + a_l^+(z_j)] \sigma_j + [a_r(z_j) + a_l(z_j)] \sigma_j^+ \} \quad (1)$$

여기서 $a_r^+(z_j) (a_l^+(z_j))$ 는 j 번째 량자점의 위치 z_j 에서 오른쪽(왼쪽)으로 전파하는 단일플라즈몬의 발생연산자, v_g 는 ω_k 가 플라즈몬의 주파수로 되는 파수 k ($\omega_k = v_g |k|$)를 가지는 플라즈몬의 군속도, Ω_j 는 j 번째 량자점들의 고유주파수, $\sigma_j = |g\rangle_{jj} \langle e| (\sigma_j^+ = |e\rangle_{jj} \langle g|)$ 는 j 번째 량자점의 상승(하강)연산자이다. 해밀터니안 H 에 들어있는 비에르미트성분은 량자점들의 려기상태의 다른 모든 가능한 통로들에로의 감쇠를 Γ'_j 를 나타낸다. $g_j = (2\pi\hbar/\omega_k) D_j e_k / (2\Omega_j)$ 는 플라즈몬도파관과 j 번째 량자점의 결합상수, D_j 는 j 번째 량자점의 이중극모멘트, e_k 는 단일플라즈몬의 편극방향단위벡토르[5], f_{ji} 는 량자점들사이의 결합상수이다.

1개의 단일플라즈몬이 왼쪽으로부터 에네르기 $E_k = \hbar\omega_k$ 를 가지고 입사해들어온다고 가정하면 $H|\psi_k\rangle = E_k|\psi_k\rangle$ 에 의하여 정의되는 계의 고유상태는 다음과 같다.

$$|\psi_k\rangle = \int dz [\phi_{k,r}^+(z) a_r^+(z) + \phi_{k,l}^+(z) a_l^+(z)] |0, g_1, g_2\rangle + e_k^{(1)} |0, e_1, g_2\rangle + e_k^{(2)} |0, e_1, g_2\rangle \quad (2)$$

여기서 $|0, g_1, g_2\rangle$ 는 플라즈몬이 하나도 없는 진공상태와 량자점들이 려기되지 않은 상태, $|0, e_j, g_i\rangle$ 는 마당은 진공상태이고 오직 j 번째 량자점만이 려기된 상태, $e_k^{(j)}$ 는 려기된 상태에서 j 번째 량자점의 확률진폭을 나타낸다. $\phi_{k,r}^+(z) (\phi_{k,l}^+(z))$ 는 위치 z 에서 오른쪽(왼쪽)으로 이동하는 플라즈몬의 파동함수를 나타낸다.

왼쪽으로부터 입사하는 단일플라즈몬에 대하여 모드함수들 $\phi_{k,r}^+(z)$, $\phi_{k,l}^+(z)$ 는 각각 다음과 같은 형태로 적을수 있다.

$$\phi_{k,r}^+(z < 0) = e^{ikz}, \quad \phi_{k,r}^+(0 < z < l) = t_1 e^{ik(z-l)}, \quad \phi_{k,r}^+(z > l) = t_2 e^{ik(z-2l)}, \\ \phi_{k,l}^+(z < 0) = r_1 e^{-ikz}, \quad \phi_{k,l}^+(0 < z < l) = r_2 e^{-ik(z-l)}, \quad \phi_{k,l}^+(z > l) = 0$$

여기서 l 은 량자점들사이의 거리이다.

식 (2)를 방정식 $H|\psi_k\rangle = E_k|\psi_k\rangle$ 에 대입하면 다음과 같은 방정식계를 얻게 된다.

$$g_1(t_1^{-ikl} - 1) + iJ_1 e_k^{(1)} = 0, \quad g_1(r_2^{-ikl} - r_1) - iJ_1 e_k^{(1)} = 0, \quad g_1(1 + r_1) + (\Delta_1 - \Gamma'_1/2) e_k^{(1)} + f_{12} e_k^{(2)} = 0, \\ g_2(t_2^{-ikl} - t_1) + iJ_2 e_k^{(2)} = 0, \quad -g_2 r_2 - iJ_2 e_k^{(2)} = 0, \quad g_2(t_1 + r_1) + (\Delta_2 - \Gamma'_2/2) e_k^{(2)} + f_{21} e_k^{(1)} = 0$$

여기서 $J_j = g_j^2/v_g$, $\Delta_j = \Omega_j - \omega_k$ ($j=1, 2$)이다.

2. 이론적해석과 결과

단일플라스몬의 투과와 반사는 플라스몬도파관의 량끝에 놓인 검출기에 의하여 관측된다.[7] 하지만 플라스몬도파관의 량끝에서 단일플라스몬이 검출되지 않는다면 계의 상태는 두 양자점들의 려기상태로 되는데 이것은 두 양자점들사이의 얽힘을 일으킨다.

정상상태에서 우의 방정식계의 해석솔이를 얻고 그로부터 두 양자점들의 얽힘척도 즉 동시발생성 C 를 고찰하였다. 두 양자점으로 이루어진 계에 대하여 동시발생성은 다음과 같다. 이때 $f_{12} = f_{21} = f (j=1, 2)$, $D=110\text{nm}$ 라고 가정하였다.

$$C = \frac{2|e_k^{(1)} \parallel e_k^{(2)}|}{|e_k^{(1)}|^2 + |e_k^{(2)}|^2}$$

먼저 같은 이행에네르기를 가지는 두 양자점들이 단일플라스몬과 공진인 상태에 있고 $g_1=g_2=g$ 일 때 양자점들과 도파관들사이의 결합세기(g)에 따르는 동시발생성을 고찰하였다. 이때 감쇠가 없다고 가정하면 려기상태에 있는 양자점의 확률진폭은 다음과 같아진다.

$$\left. \begin{aligned} e_k^{(1)} &= -\frac{igv_g[(-1+e^{i2kd})g^2 + ie^{ikd}fv_g]}{(-1+e^{i2kd})g^4 + 2ie^{ikd}fg^2v_g - f^2v_g^2} \\ e_k^{(2)} &= -\frac{fgv_g^2}{(-1+e^{i2kd})g^4 + 2ie^{ikd}fg^2v_g - f^2v_g^2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

식 (3)으로부터 립자간결합이 없다면 두 양자점들사이의 얽힘은 발생되지 않는다는것을 알수 있다. 그러나 립자간호상작용에서 립자간결합세기(f), 양자점과 도파관의 결합세기, 단일플라스몬의 군속도, 립자간거리와 같은 파라메터를 조종하여 동시발생성을 조종할수 있다.

$f=20\text{GHz}$ 일 때 양자점-도파관결합에 대한 동시발생성의 의존성은 그림 2와 같다.

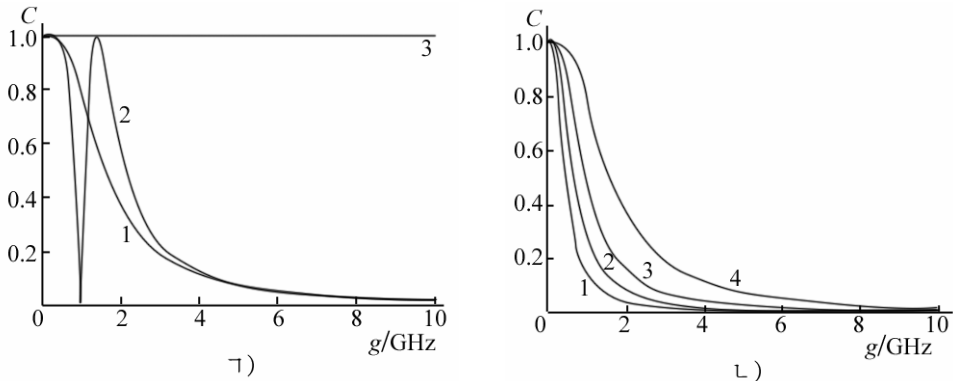


그림 2. $f=20\text{GHz}$ 일 때 양자점-도파관결합에 대한 동시발생성의 의존성

ㄱ) $v_g = 9.55 \cdot 10^7 \text{ m/s}$ 일 때, 1-3은 kd 가 0.5π , 1.5π , π 인 경우,

ㄴ) $kd = 0.5\pi$ 일 때, 1-4는 v_g 가 $0.82 \cdot 10^7$, $1.65 \cdot 10^7$, $3.44 \cdot 10^7$, $9.55 \cdot 10^7 \text{ m/s}$ 인 경우

그림 2의 ㄱ)에서 보는바와 같이 $kd = \pi$ 인 경우에 동시발생성은 임의의 양자점-도파관결합에 대하여 최대값 1을 가지는데 이것은 진폭 $e_k^{(1)}$ 가 $e_k^{(2)}$ 혹은 $-e_k^{(2)}$ 이라는것을 의미한다. 이 경우에 두 양자점들은 3중 또는 단일얽힘을 이루게 된다. 그러나 양자점

의 결합이 강해질 때 $kd=0.5\pi$ 에 대하여 동시발생성은 1에서 0으로 다가가고 특히 $kd=1.5\pi$ 에 대하여 최소값 0을 가지는 흡이 존재하게 된다. 또한 그림 2의 L)에서 보는바와 같이 $kd=0.5\pi$ 인 때 군속도가 작을수록 여기서 동시발생성은 더 빨리 1에서 0으로 다가가는다. $f=35\text{GHz}$ 일 때 양자점들의 위상차에 따르는 동시발생성은 그림 3과 같다.

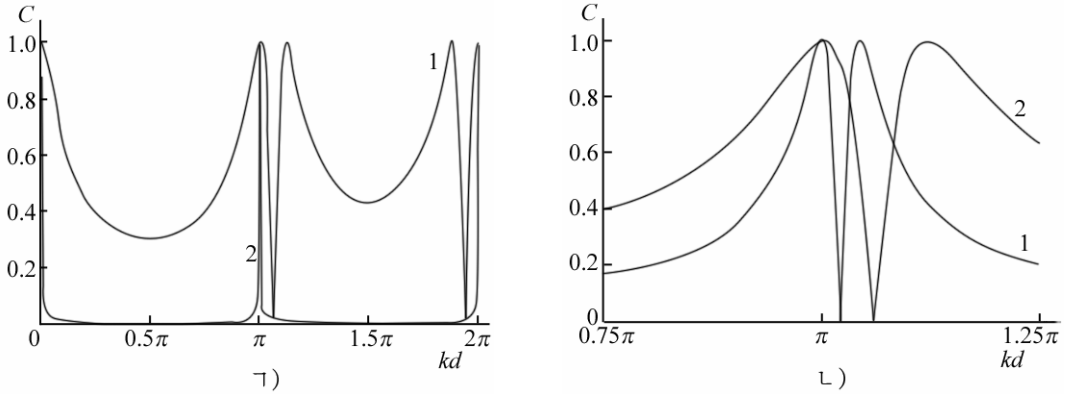


그림 3. $f=35\text{GHz}$ 일 때 양자점들의 위상차에 따르는 동시발생성

1) $v_g = 9.55 \cdot 10^7 \text{ m/s}$ 일 때, 1, 2는 g 가 35, 3GHz인 경우,

2) $g = 35\text{GHz}$ 일 때, 1, 2는 v_g 가 $3.44 \cdot 10^7$, $9.55 \cdot 10^7 \text{ m/s}$ 인 경우

원리적으로 두 양자점들사이의 위상차는 립자간거리를 의미하는데 그것은 단일플라즈몬수송뿐아니라 두 양자점들사이의 얹힘에서도 중요한 역할을 한다.

그림 3의 1)에서 보는바와 같이 동시발생성은 π 의 주기를 가지는 주기적특성을 가진다. 특히 결합세기가 3GHz일 때 동시발생성은 $kd=n\pi$ ($n=0, 1, 2, \dots$)에서 최대값이 1인 예리한 봉우리를 가진다. 이것은 두 양자점들사이에 높은 얹힘을 실현하고 절환하는데 쓰일 수 있다. 결합세기가 35GHz인 때 동시발생성은 $kd=n\pi$ 근방에서 최대값이 1인 2개의 봉우리를 가진다. 또한 그림 3의 2)에서 보는바와 같이 결합세기가 35GHz일 때 나타나는 2개의 봉우리사이의 거리는 군속도가 작을수록 작다.

다음으로 두 양자점들이 같은 이행에너지와 양자점-도파관결합세기를 가질 때 그것에 따르는 동시발생성을 고찰하였다.(그림 4)

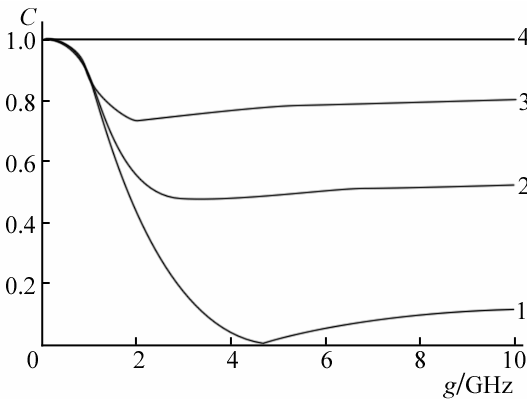


그림 4. 양자점-도파관결합세기에 따르는 동시발생성

1-4는 Δ 가 0, $0.05\Gamma_{pl}$, $0.1\Gamma_{pl}$, Γ_{pl} 인 경우

이때 $kd=0.5\pi$, $v_g = 9.55 \cdot 10^7 \text{ m/s}$, $f = 35\text{GHz}$, $\Gamma = 0.025\Gamma_{pl}$, $\Gamma_{pl} = 4\pi g^2 / v_g$ 로 설정하였다.

그림 4에서 보는바와 같이 양자점들이 단일플라즈몬과 공진일 때 어떤 특정한 결합세기에 대하여 최소값 0을 가진다. 그러나 그 특성은 탈조량이 증가함에 따라 사라지고 두 양자점들은 넓은 범위의 양자점-도파관결합세기에 대하여 높은 얹힘상태에 있게 된다. 특히 $\Delta = \Gamma_{pl}$ 일 때 동시발생성은 임의의 도파관-양자점결합에 대하여 변화되지 않는다.

맺 는 말

립자간호상작용하에서 플라즈몬도파관과 결합된 두 양자점들의 얽힘을 여러가지 물리적파라미터들에 대한 동시발생성의 의존성을 고려하면서 이론적으로 고찰하였다. 두 양자점들의 얽힘은 양자점들사이의 직접결합세기, 양자점과 플라즈몬도파관사이의 호상작용, 립자간거리, 총감쇠률, 탈조량을 조종하여 실현할수 있다. 이 파라미터들을 적당히 조절하여 두 양자점들이 입사하는 단일플라즈몬과 공진인 상태에서도 높고낮은 얽힘을 절환시킬수 있다.

참 고 문 헌

- [1] D. E. Chang et al.; Nat. Phys., **3**, 807, 2007.
- [2] L. Carziano et al.; Phys. Rev. Lett., **117**, 043601, 2016.
- [3] Q. Li et al.; Nano Lett., **14**, 3358, 2014.
- [4] C. L. C. Smith et al.; Nanoscale, **7**, 9355, 2015.
- [5] C. Gonzalez-Ballester et al.; Phys. Rev., A **89**, 042328, 2014.
- [6] H. Walther et al.; Rep. Prog. Phys., **69**, 1325, 2006.
- [7] P. Yao et al.; Opt. Express, **17**, 11505, 2009.
- [8] R. Horodecki et al.; Rev. Mod. Phys., **81**, 865, 2009.

주체107(2018)년 6월 5일 원고접수

Influence of Interparticle Coupling Effect on the Entanglement of Two QDs Coupled to Plasmonic Waveguide

Ko Myong Chol, Kim Nam Chol

We theoretically investigated the entanglement of two quantum dots(QDs) coupled to metallic nanowaveguide in the presence of the flip-flop interaction with the analytical solutions of eigenvalue equations of the coupled system. The high entanglement of two QDs could be achieved by adjusting the direct coupling strength of the QDs, the interaction of QDs with near-zero waveguide modes, interparticle distance of the QDs, total dissipation and detuning even when two QDs are resonant with the incident single plasmon. The discussed system with the flip-flop interaction provides us with a rich way to realize the quantum information processing such as quantum communication and quantum computation.

Key words: quantum dot, entanglement, simple plasmon, waveguide