

1차원표면플라즈몬도파관과 결합된 세량자점계에서 발생하는 얽힘특성

럼주성, 고명철, 김남철

빛량자들이 정보나르개로 광범히 리용되면서 발전하기 시작한 량자정보처리기술은 오늘날 사람들이 예견하지 못하였던 놀라운 결과들을 내놓으면서 많은 나라들의 관심을 모으고있다.[1] 빛량자들사이의 호상작용이 약하고 전파속도가 빠르기때문에 이것을 정보나르개로 리용하면 량자통신[2]이나 량자계산[3]을 비롯한 량자정보처리를 실현할수 있는데 여기서 중요한 문제는 빛량자들의 량자상태를 조종하고 그것을 안전하게 멀리 전송하는것이다. 최근에 1차원적으로 배열된 공진기렬[4], 빛량자결정[5], 금속-유전체경계면[6]에서와 같이 도파관을 량자계와 결합시켜 빛량자의 전송을 조종하거나 량자계들사이의 얽힘특성을 조종할수 있다는것이 알려졌다. 1차원도파관을 리용하면 빛량자를 에돌이한계이하에서도 전송시킬수 있으며 이것을 리용하여 단일빛량자3극소자, 빛스위치, 단일빛량자원천 등과 같은 나노대역에서의 량자장치들을 개발할수 있다. 또한 량자계들사이의 높은 얽힘을 형성하고 그것을 조종하면 량자론리문을 구성하여 량자컴퓨터나 량자알고리즘을 실현할수 있다.[7] 선행연구들에서는 량자계들사이의 얽힘특성을 조종하기 위하여 다립자계의 얽힘을 연구하였지만 거기에서는 량자계들사이의 호상작용만을 논의하였다.[8] 1차원도파관을 리용하는 경우에도 량자점이 2개인 경우으로 문제를 귀착시키고 도파관을 리용하여 다립자계의 얽힘특성을 조종하기 위한 문제를 설정하지 못하였다.[9]

논문에서는 1차원도파관과 결합된 다립자계의 얽힘특성을 실공간방법을 리용하여 리론적으로 해석하였다. 여기서는 동시발생도를 리용하여 1차원도파관을 통하여 호상작용하는 량자점들의 얽힘정도를 정량적으로 평가하였으며 량자점들사이의 거리, 입사주파수와 량자점들의 이행주파수와와의 탈조, 량자점들과 도파관사이의 결합을 리용하여 얽힘특성을 조종할수 있다는것을 밝혔다.

1. 리론적모형과 동력학적방정식

금속나노선인 1차원표면플라즈몬도파관과 결합된 등간격 및 비등간격으로 놓여있는 3개의 량자점으로 이루어진 나노계에서 발생하는 얽힘을 고찰해보자.(그림 1)

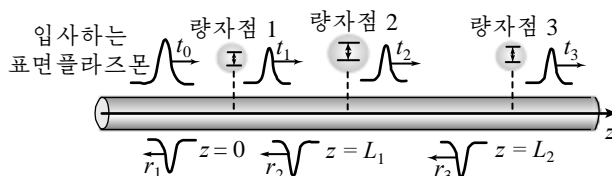


그림 1. 1차원표면플라즈몬도파관과 3개의 량자점들로 이루어진 나노계의 모형

회전과근사를 리용하면 실공간방법에서 계의 하밀토니안은 다음과 같이 주어진다.[4]

$$H = \sum_{j=1}^3 [(\omega_e^{(j)} - i\Gamma_j'/2)\sigma_{ee}^j + \omega_g^{(j)}\sigma_{gg}^j] + iv_g \int_{-\infty}^{\infty} dz [a_l^+(z)\partial_z a_l(z) - a_r^+(z)\partial_z a_r(z)] + \sum_{j=1}^3 g_j \{ [a_r^+(z_j) + a_l^+(z_j)]\sigma_{ge}^j + [a_r(z_j) + a_l(z_j)]\sigma_{eg}^j \} \quad (1)$$

여기서 $\omega_e^{(j)}$ 와 $\omega_g^{(j)}$ 는 각각 j 번째 량자점의 상태 $|g\rangle$ 와 $|e\rangle$ 의 고유주파수이고 ω_k 는 파수 $k(\omega_k = v_g |k|)$ 를 가지고 전파하는 입사플라즈몬의 주파수이다. $\sigma_{eg}^j = |e\rangle_j \langle g|$ ($\sigma_{ge}^j = |g\rangle_j \langle e|$) 는 j 번째 량자점의 상승(하강)연산자이고 $a_r^+(z_j)(a_l^+(z_j))$ 는 j 번째 량자점이 있는 위치 z_j 에서 오른쪽(왼쪽)으로 전파하는 표면플라즈몬을 발생시키는 보존연산자이다. v_g 는 ω_k 에 대응하는 군속도이고 비에르미트성분 Γ_j' 는 다른 모든 통로에로의 붕괴속도를 가진 상태 $\omega_e^{(j)}$ 의 붕괴률을 나타낸다. $g_j = (2\pi\hbar/\omega_k)^{1/2}\Omega_j \mathbf{D}_j \cdot \mathbf{e}_k$ 는 j 번째 량자점과 단일표면플라즈몬과의 결합상수이고 Ω_j 는 j 번째 량자점의 공명에너지이며 \mathbf{D}_j 는 j 번째 량자점의 2중극모멘트, \mathbf{e}_k 는 표면플라즈몬의 편극단위벡토르이다.[5] 단일표면플라즈몬이 에너지 $E_k = \hbar\omega_k$ 를 가지고 왼쪽으로부터 입사한다고 하면 정상상태의 슈뢰딩게르방정식 $H|\psi_k\rangle = E_k|\psi_k\rangle$ 에 의하여 정의된 계의 고유상태는 다음의 형식으로 구성된다.

$$|\psi_k\rangle = \int dz [\phi_{k,r}^+(z)a_r^+(z) + \phi_{k,l}^+(z)a_l^+(z)]|0, g\rangle + \sum_{j=1}^3 e_k^{(j)}|0, e_j\rangle \quad (2)$$

여기서 $|0, g\rangle$ 는 플라즈몬이 하나도 없는 진공상태와 량자점들이 려기되지 않은 상태를 표시하며 $|0, e_j\rangle$ 는 마땅이 진공상태이고 오직 j 번째 량자점만이 려기된 상태를 나타내며 $e_k^{(j)}$ 는 려기된 상태에서 j 번째 량자점의 확률진폭을 나타낸다. $\phi_{k,r}^+(z)(\phi_{k,l}^+(z))$ 는 위치 z 에서 오른쪽(왼쪽)으로 전파하는 표면플라즈몬의 파동함수를 나타낸다.

왼쪽으로부터 입사하는 플라즈몬에 대하여 모드함수들에 대한 경계조건 ($t_0 + r_1 = t_1 e^{-ikL_1} + r_2 e^{ikL_1}$, $t_1 + r_2 = t_2 e^{-ikL_2} + r_3 e^{ikL_3}$, $t_2 + r_3 = t_3 e^{-ik(L_1+L_2)} + r_4$, 여기서 $t_0 = 1$, $r_4 = 0$)과 슈뢰딩게르방정식을 리용하면 투과 및 반사진폭과 확률진폭을 얻는다.

$$\text{량자계들사이의 얽힘을 정량적으로 나타내는 동시발생도 } C_{12} = \frac{2|e_k^{(1)}| \cdot |e_k^{(2)}|}{|e_k^{(1)}|^2 + |e_k^{(2)}|^2 + |e_k^{(3)}|^2},$$

$C_{23} = \frac{2|e_k^{(2)}| \cdot |e_k^{(3)}|}{|e_k^{(1)}|^2 + |e_k^{(2)}|^2 + |e_k^{(3)}|^2}$ 을 평가하여 2개의 량자점들사이에 이루어지는 얽힘특성을 평가할수 있다.

세량자점계를 두 부분으로 나누어 생각할 때 1개의 량자점과 나머지 2개의 량자점사이에 이루어지는 얽힘특성도 고찰할수 있다. 이것은 다음의 식으로 평가할수 있다.

$$C_{1,23} = \frac{2|e_k^{(1)}| \cdot \sqrt{|e_k^{(2)}|^2 + |e_k^{(3)}|^2}}{|e_k^{(1)}|^2 + |e_k^{(2)}|^2 + |e_k^{(3)}|^2}, \quad C_{3,12} = \frac{2|e_k^{(3)}| \cdot \sqrt{|e_k^{(1)}|^2 + |e_k^{(2)}|^2}}{|e_k^{(1)}|^2 + |e_k^{(2)}|^2 + |e_k^{(3)}|^2}$$

2. 이론적해석과 수값결과

1차원도파관과 결합된 양자점들사이의 얽힘특성을 양자점이 2개인 경우[9]와 3개인 경우와의 대비속에서 평가하자. 모든 계산에서 감쇠를 무시할수 있고 $g_j^2/v_g \equiv J_j$, $J_1 = J_2 = J_3 = J$ 라고 가정한다.

그림 2에 양자점들사이의 위상에 따르는 2개의 양자점인 경우(ㄱ))의 동시발생도와 3개의 양자점이 등간격으로 배치되어있는 경우에 첫 두 양자점(ㄴ))과 마지막 두 양자점(ㄷ))사이의 동시발생도를 보여주었다. 그림 2에서 알수 있는것처럼 양자점사이의 동시발생도는 위상 π 를 주기로 하여 주기적인 특성을 나타낸다. 그림 2의 ㄱ)에서 보는것처럼 양자점이 2개인 계의 경우에는 위상이 π 인 근방에 2개의 봉우리가 있지만 그림 2의 ㄴ)에서 보는것처럼 양자점이 3개인 계의 경우에는 3개의 봉우리가 있다. 이것은 양자계가 많아질수록 양자점들사이에서 높은 동시발생도를 가진 얽힘특성이 나타난다는것을 보여준다. 또한 양자계들사이의 얽힘절환을 실현하는데서도 다립자계가 두량자점계의 경우보다 더 편리하다는것을 알수 있는데 이러한 결과들은 양자정보처리에서 정보원천을 형성하는데 널리 리용할수 있다.

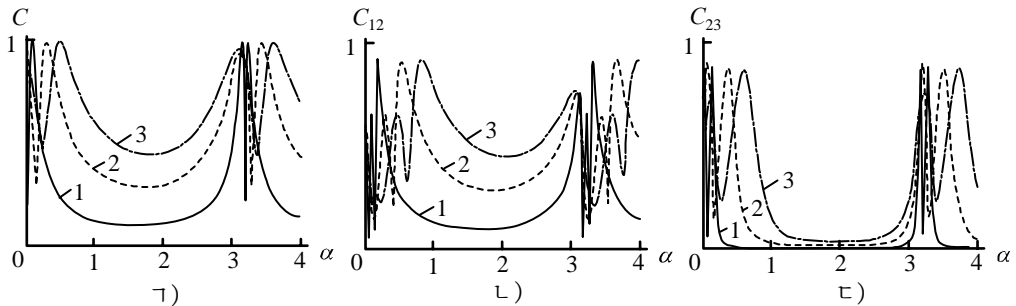


그림 2. 양자점이 2개(ㄱ)), 3개(ㄴ), ㄷ))인 계에서 두 양자점들사이의 동시발생도
1-3은 각각 $\delta = 0.1, 0.3, 0.5J$ 인 경우

그림 3에 3개 양자점계에서 한 양자점과 나머지 2개의 양자점사이에 발생하는 두부분얽힘특성에 대하여 2개의 양자점만 있는 경우와 대비하여 보여주었다. 그림 3을 통하여 알수 있는것처럼 다립자계의 두부분얽힘특성도 위상이 π 인 근방에서 두량자점계의 경우보다 많은 봉우리특성을 나타내며 봉우리들사이에는 넓은 위상구간에 대하여 높은 얽힘을 보장할수 있다는것을 알수 있다. 이러한 특성은 양자점과 입사플라즈몬사이의 탈조량이 증가할수록 더욱 뚜렷하게 나타나며 특히 그림 3의 ㄷ)에서 볼수 있는바와 같이 탈조량이 $\delta = 0.5J$ 일 때 많은 구간에서 동시발생도가 거의 1에 가까운 높은 얽힘이 이루어진다. 양자정보처리에서 양자점들은 단일포톤을 발생시키거나 포톤들을 저장하는데 많이 리용되는데 이런 양자점들사이의 높은 얽힘을 보장하는것은 정보전달과 양자계산을 위한 양자론리문구성에서 중요한 요구로 나선다.

이러한 결과들은 광대역위상구간에서의 높은 얽힘을 보장할수 있게 하는것으로 하여 양자계산이나 양자통신에 유용하게 리용할수 있다.

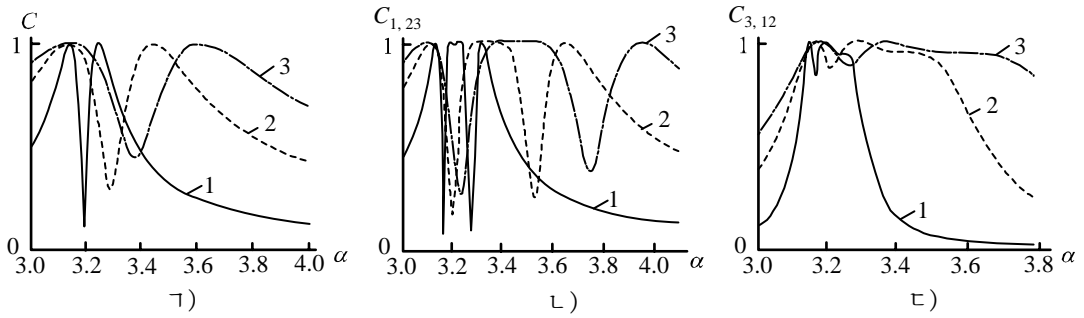


그림 3. 량자점이 2개(ㄱ), 3개(ㄴ, ㄷ)인 계에서 두부분얹힘의 동시발생도
1-3은 그림 2에서와 같음

마지막으로 1차원도파관과 결합된 3개의 량자점이 비등간격으로 배치되어있을 때 두 량자점들사이의 얹힘특성과 두부분얹힘특성에 대하여 보기로 하자. 그림 4에 첫 두 량자점사이의 위상을 $\pi/2$ 로 고정시켰을 때 마지막 두 량자점들사이의 위상에 따르는 동시발생도를 보여주었다. 그림 4에서 보는것처럼 탈조량이 증가할수록 봉우리의 폭은 넓어지면서 오른쪽으로 편기된다는것을 알수 있다. 특히 모든 경우에 대하여 탈조량이 $\delta=0.1J$ 일 때 얹힘특성은 좋은 절환효과를 나타낸다. 특히 그림 3의 ㄷ)와 ㄴ)에서 볼수 있는바와 같이 0과 π 근방에서 동시발생도가 거의 1에 가까운 높은 얹힘과 낮은 얹힘사이의 절환효과가 발생한다.

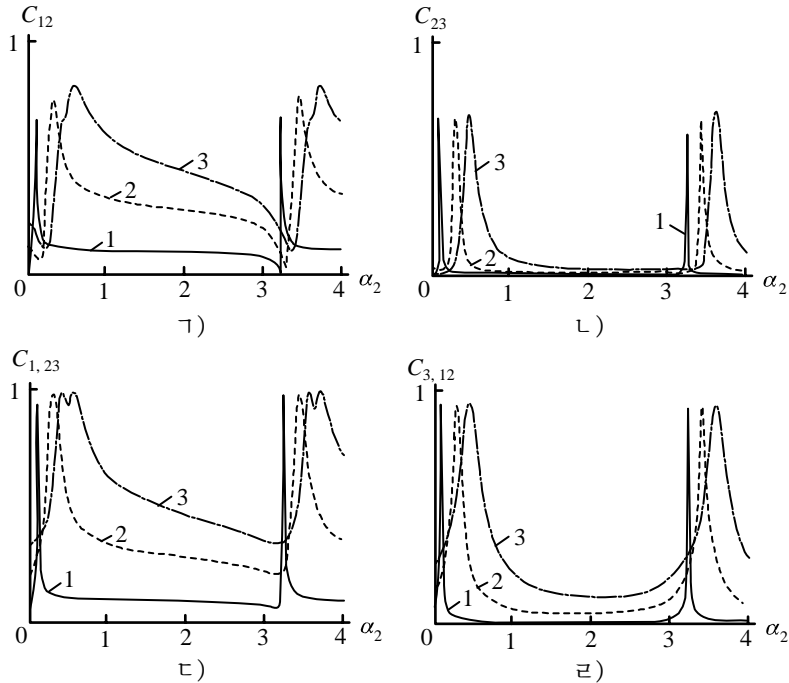


그림 4. $\alpha_1 = \pi/2$ 인 경우 비등간격배치의 세량자점계에서 동시발생도
1-3은 그림 2에서와 같음

맺는 말

론문에서는 1차원도파관과 결합된 다립자계의 얽힘특성을 동시발생도를 가지고 정량적으로 연구하였다. 양자정보처리에서 중요한 문제의 하나로 나서고있는 양자계들사이의 얽힘특성조종을 1차원도파관과 양자계들을 결합시킴으로써 양자계와 도파관사이의 결합, 양자계의 이행주파수와 외부마당과의 탈조량, 양자계들사이의 거리를 비롯한 여러가지 파라미터들을 리용하여 실현할수 있다는것을 보여주었다. 특히 다립자계의 두부분얽힘은 두 양자점계를 리용할 때보다 높고 절환효과도 좋은 특성을 가진다.

참고 문헌

- [1] S. Haroche; Rev. Mod. Phys., 85, 1083, 2013.
- [2] Z. T. Liang et al.; Phys. Rev., A 89, 062312, 2014.
- [3] G. Vallone et al.; Phys. Rev. Lett., 115, 040502, 2015.
- [4] H. Walther et al.; Rep. Prog. Phys., 69, 1325, 2006.
- [5] L. Carziano et al.; Phys. Rev. Lett., 117, 043601, 2016.
- [6] P. Yao et al.; Opt. Express, 17, 11505, 2009.
- [7] S. Mahmoodian et al.; Phys. Rev. Lett., 117, 240501, 2016.
- [8] T. J. Osborne1 et al.; Phys. Rev. Lett., 96, 220503, 2006.
- [9] C. G. Ballester et al.; Phys. Rev., A 89, 042328, 2014.

주제108(2019)년 6월 5일 원고접수

Properties of Entanglement Created in Three-QD System Coupled to 1D Surface Plasmonic Waveguide

Ryom Ju Song, Ko Myong Chol and Kim Nam Chol

We investigated theoretically the properties of the entanglement created in the three quantum dots(QDs) system coupled to one dimensional surface plasmonic waveguide via the real-space approach. High entanglement of the QDs could be achieved by adjusting the interparticle distance of the QDs and detuning.

Key words: quantum dot, quantum entanglement, plasmonic waveguide