

두 플라즈몬도파관과 양자점을 리용한 단일플라즈몬경로기모형

최혁, 고명철, 김남철

최근에 양자정보학은 전자보다도 단일포톤을 정보나르개로 리용함으로써 급속한 발전을 이룩하고있다.[1, 2] 일반적으로 포톤은 외부마당과 약하게 호상작용하며 빠른 전파속도로 하여 양자정보처리에서 매우 큰 관심사로 되고있다.[3-5] 단일포톤3극소자의 이론적모형[5]이 제안된 이후에 단일포톤3극소자, 단일포톤스위치, 원자거울과 같은 여러가지 양자장치들에 대한 실험적연구[3-5]가 많이 진행되었다.

이러한 양자장치에서 기본요소가 바로 양자경로기인데 그것은 최량조종을 통하여 양자신호들을 목적하는 마디점들에 전송하거나 분배함으로써 단일포톤준위에서 양자신호들의 경로를 조종하기 위한 필수적장치이다. 최근에 여러가지 양자계들을 리용하여 양자경로기에 대한 이론적 및 실험적연구들을 진행한 결과[4-5] 단일포톤을 조종할수 있다는 것이 밝혀졌지만 양자점과 플라즈몬도파관이 결합된 계를 리용한 단일플라즈몬경로기모형은 제기된것이 없다. 논문에서는 두 플라즈몬도파관사이에 끼인 V형양자점을 리용한 단일플라즈몬경로기모형을 제기하고 그 작용물림새를 이론적으로 밝혔다.

1. 이론적모형과 동력학적방정식

그림 1에 두 플라즈몬도파관과 그것들사이에 놓인 V형양자점으로 이루어진 단일플라즈몬경로기를 보여주었다. 바닥상태 $|g\rangle$ 와 2개의 러기상태 $|e\rangle, |s\rangle$ 로 표시되는 V형에너지구조를 가지는 InGaAs양자점의 두 2중극이행 $|g\rangle \leftrightarrow |e\rangle$ 와 $|g\rangle \leftrightarrow |s\rangle$ 는 결합상수 g_a 와 g_b 를 가지고 플라즈몬도파관들인 a, b 와 결합되고 라비주파수 Ω 를 가지는 다른 이행 $|e\rangle \leftrightarrow |s\rangle$ 는 주파수 $\omega = \omega_e - \omega_s$ 를 가지는 고전마당과 공명결합된다.

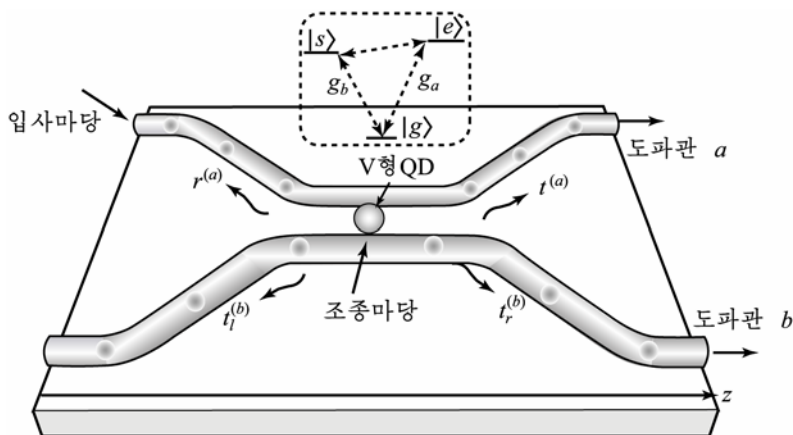


그림 1. 두 플라즈몬도파관과 그것들사이에 놓인 양자점으로 이루어진 단일플라즈몬경로기

계의 전체 하밀토니안은 회전파근사에서 $H = H_{\text{WG}} + H_{\text{QD}} + H_{\text{WG-QD}}$ 로 표시되는데 여기서 첫항은 도파관 a 와 b 의 자유하밀토니안이고 두번째 항은 V형량자점의 하밀토니안이며 세번째 항은 량자점과 플라즈몬도파관사이의 호상작용을 나타낸다.

$$H_{\text{WG}} / \hbar = iv_{g,a} \int_{-\infty}^{\infty} dz [a_l^{(a)+}(z) \partial_z a_l^{(a)}(z) - a_r^{(a)+}(z) \partial_z a_r^{(a)}(z)] + \\ + iv_{g,b} \int_{-\infty}^{\infty} dz [a_l^{(b)+}(z) \partial_z a_l^{(b)}(z) - a_r^{(b)+}(z) \partial_z a_r^{(b)}(z)] \quad (1)$$

$$H_{\text{QD}} / \hbar = (\omega_e - i\Gamma_e / 2) |e\rangle\langle e| + (\omega_s - i\Gamma_s / 2) |s\rangle\langle s| + \Omega |e\rangle\langle s| + \Omega |s\rangle\langle e| \quad (2)$$

$$H_{\text{WG-QD}} / \hbar = g_a \{ |a_r^{(a)+}(z) + a_l^{(a)+}(z)\rangle\langle g|e| + |a_r^{(a)+}(z) + a_l^{(a)+}(z)\rangle\langle g|s| \} + \\ + g_b \{ |a_r^{(b)+}(z) + a_l^{(b)+}(z)\rangle\langle g|s| + |a_r^{(b)+}(z) + a_l^{(b)+}(z)\rangle\langle g|e| \} \quad (3)$$

여기서 $a_r^{(j)+}(z)(a_l^{(j)+}(z))(j=a, b)$ 는 량자점의 위치($z=0$)에서 오른쪽(왼쪽)으로 전파하는 보존연산자이고 $v_{g,a}$ 는 파동벡터 $\mathbf{k}(\omega_j = |j|)(j=e, s)$ 인 표면플라즈몬의 군속도이다. 비에르미트항 $\Gamma_j(j=e, s)$ 는 음손실과 같이 자유공간과 다른 통로들여로의 붕괴에 의한 매려기자들의 전체 감쇠를인데 계산에서는 령으로 설정한다.

에네르기가 $E_k = \hbar\omega_k$ 인 표면플라즈몬이 도파관 a 의 왼쪽에서 입사한다고 가정하면 $H|\psi_k\rangle = E_k|\psi_k\rangle$ 에 의하여 결정되는 단일렐기상태는 다음과 같이 쓸수 있다.

$$|\psi_k\rangle = \int dz [\phi_{k,r}^{(j)+}(z) a_r^{(j)+}(z) + \phi_{k,l}^{(j)+}(z) a_l^{(j)+}(z)] |0, g\rangle + e_k^{(e)} |0, e\rangle + e_k^{(s)} |0, s\rangle (j=a, b) \quad (4)$$

왼쪽으로 입사하는 단일플라즈몬에 대한 모드함수 $\phi_{k,r}^{(j)+}(z)$ 와 $\phi_{k,l}^{(j)+}(z)$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$\phi_{k,r}^{(a)+}(z) = \begin{cases} e^{ikz}, & z < 0 \\ t^{(a)} e^{ikz}, & z > 0 \end{cases}, \quad \phi_{k,l}^{(a)+}(z) = \begin{cases} r^{(a)} e^{-ikz}, & z < 0 \\ 0, & z > 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\phi_{k,r}^{(b)+}(z) = \begin{cases} 0, & z < 0 \\ t_r^{(b)} e^{ikz}, & z > 0 \end{cases}, \quad \phi_{k,l}^{(b)+}(z) = \begin{cases} 0, & z < 0 \\ t_l^{(b)} e^{-ikz}, & z > 0 \end{cases} \quad (6)$$

여기서 $t^{(a)}(r^{(a)})$ 는 위치 z 에서 도파관 a 의 투과(반사)진폭을 나타내며 $t_r^{(b)}(t_l^{(b)})$ 는 도파관 b 에서 앞(뒤)로 전파하는 수송결수를 나타낸다. 방정식 (4)를 $H|\psi_k\rangle = E_k|\psi_k\rangle$ 에 대입하고 련속성 $t^{(a)} = 1 + r^{(a)}$ 와 $t_l^{(b)} = t_r^{(b)} = t^{(b)}$ 를 가지는 모드함수를 고려하면 2개의 플라즈몬 도파관에서 투과진폭과 수송결수를 얻는다.

$$t^{(a)} = \frac{i\delta_e(J_b + i\delta_s) + \Omega^2}{(J_a + i\delta_e)(J_b + i\delta_s) + \Omega^2} \quad (7)$$

$$t^{(b)} = \frac{ig_a J_b \Omega}{g_b(J_a + i\delta_e)(J_b + i\delta_s) + \Omega^2} \quad (8)$$

여기서 $\delta_j = \omega_j - \omega_k (j=e, s)$, $g_j^2 / v_{g,j} \equiv J_j (j=a, b)$ 이다. 식 (7)과 (8)로부터 알수 있는것 처럼 도파관 a 로 입사하는 단일플라즈몬은 고전마당이 없을 때에만 투과 및 반사되고 고전마당을 작용시키면 도파관 a 에서 b 로 넘어가게 된다.

2. 이론적해석과 수값결과

긴시간극한에서 입사하는 단일플라즈몬에 대하여 계의 경로특성은 투과율 $T^{(a)} \equiv |t^{(a)}|^2$, 반사결수 $R^{(a)} \equiv |r^{(a)}|^2$ 과 수송결수 $T^{(b)} \equiv |t^{(b)}|^2$ 에 의하여 특징지어진다. 그림 2에 고전마당을 작용시키거나 작용시키지 않을 때 V형량자점과 호상작용하는 두 플라즈몬도파관으로 전파하는 단일플라즈몬의 투과, 반사, 수송결수를 탈조량의 함수로 보여주었다. 그림 2의 ㄱ)는 고전마당이 작용하지 않을 때 도파관 a에 입사하는 단일플라즈몬의 투과율을 보여준다. 그림 2의 ㄱ)에서처럼 양자점과 도파관 a사이의 결합상수 J_a 가 커질 때 투과스펙트르는 넓어지고 $\delta=0$ 에서 하나의 완전반사봉우리가 나타나는데 이것은 선행연구결과[5]와 일치한다. 고전마당의 작용으로 도파관 a에서 b로 단일플라즈몬수송이 일어나므로 그림 2의 ㄴ)에서처럼 투과율 $T^{(b)}$ 가 령으로 되지 않는다. 그림 2의 ㄴ)에서는 $\Omega=0.3$ 일 때 도파관 b가 없는 조건에서 투과율과 반사결수를 보여준다. 그림 2의 ㄴ)에서 알수 있는것처럼 완전투과봉우리는 입사하는 단일플라즈몬의 주파수와 양자점의 이행주파수가 일치할 때 발생한다. 대신에 2개의 완전반사봉우리는 공진이 아닌 $\delta=\pm\Omega$ 에서 생긴다. 그림 2의 ㄷ)는 도파관 a, b의 전체 산란스펙트르를 보여준다. 그림 2의 ㄷ)로부터 알수 있는것처럼 그림 2의 ㄱ)와 ㄴ)의 경우에는 단일플라즈몬이 도파관 a에서 b로 넘어갈수 없다. 그러나 그림 2의 ㄴ)의 경우에는 단일플라즈몬이 도파관 a에서 도파관 b로 넘어가며 이때 수송보존방정식 $T^{(a)} + R^{(a)} + 2T^{(b)} = 1$ 을 만족시키므로 고전마당이 입사하는 단일플라즈몬의 경로를 한통로에서 다른 통로에로 바꾸어준다는것을 알수 있다.

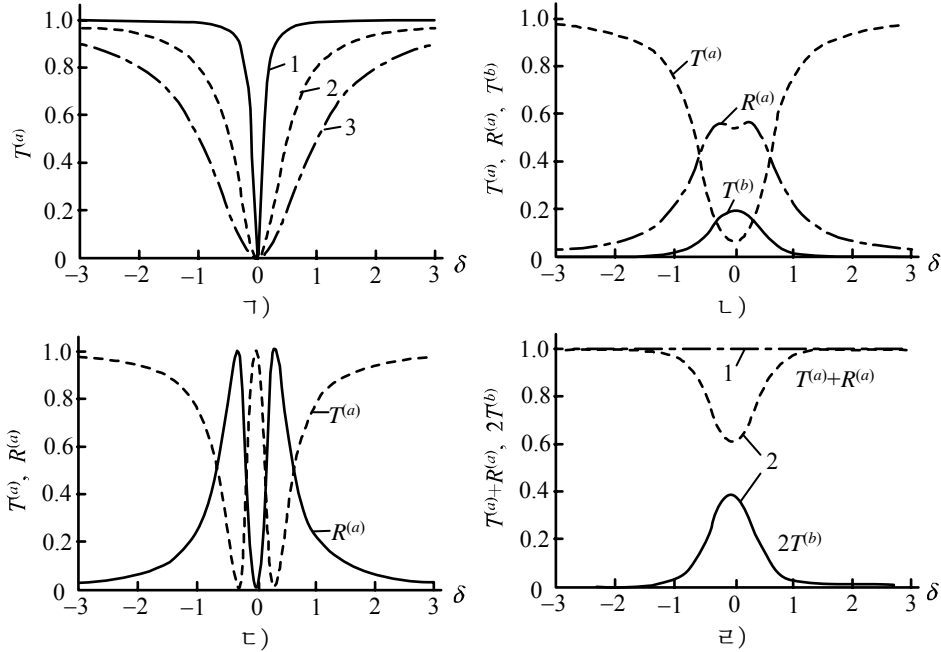


그림 2. 고전마당을 작용시키거나 작용시키지 않을 때 V형량자점과 호상작용하는 두 플라즈몬도파관에서 전파하는 단일플라즈몬의 탈조량 δ 의 함수로서 투과, 반사, 수송결수

ㄱ) $\Omega=0$, $J_a=J_b=J$, 1-3은 각각 $J=0.1, 0.5, 1$ 인 경우, ㄴ) $\Omega=0.3$, $J_a=J_b=0.5$,

ㄷ) $\Omega=0.3$, $J_a=0.5$, $J_b=0$, ㄹ) 1-ㄱ), ㄷ)의 경우, 2-ㄴ)의 경우

이제 고전마당의 세기가 서로 다를 때 입사하는 단일플라즈몬의 주파수에 따르는 수송결수를 논의하자.

그림 3의 ㉠)는 도파관 b ($J_b = 0$)가 없을 때 단일플라즈몬의 투과율을 보여준다. $\Omega = 0.01$ 일 때 공진주파수들인 $\omega_k = 1.0125\omega_0$ 과 $\omega_k = 1.0129\omega_0$ 에서 완전반사봉우리가 나타난다. 그림 3의 ㉠)에서 양자점과 도파관 b 사이의 결합이 존재하지 않을 때에도 $\omega_k = \omega_s$ 에서 완전반사봉우리가 나타나는데 이것은 단일플라즈몬스위치로 동작할수 있다. 또한 고전마당의 세기가 증가할 때 투과스펙트럼이 넓어진다는것을 알수 있는데 이것을 실전에서 응용할수 있다.

그림 3의 ㉡)와 ㉢)는 투과스펙트럼과 수송결수들인 $T^{(a)}$ 와 $T^{(b)}$ 를 각각 보여준다. 그림 3의 ㉡)에서는 고전마당의 세기가 약할 때 $\omega_k = \omega_e$ 근방에서 반사봉우리가 나타나며 그림 3의 ㉢)에서 보여준것처럼 $\omega_k = \omega_e$ 에서 입사하는 단일플라즈몬은 도파관 a 에서 도파관 b 로 넘어간다는것을 알수 있다. 도파관 b 에서 단일플라즈몬의 수송봉우리가 2개 나타나며 고전마당이 세질 때 그사이의 간격은 더 넓어지게 된다. 이것은 도파관 a 에서 도파관 b 로의 단일플라즈몬의 수송결수를 고전마당의 세기를 조종하여 변화시킬수 있다는것을 보여준다.

그림 3의 ㉣)에서는 도파관 a 와 b 의 전체적인 수송결수를 각각 보여주었는데 수송결수가 최대가 되는 봉우리의 위치는 결합상수 J_a 와 J_b , 고전마당의 세기와 같은 파라미터를 조종하여 변화시킬수 있다는것을 알수 있다.

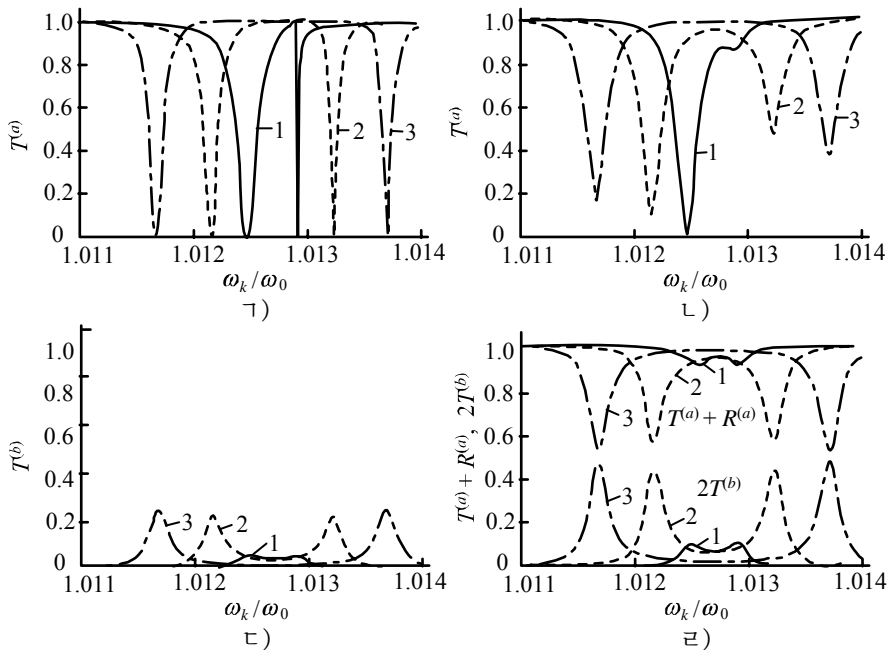


그림 3. 고전마당의 세기가 서로 다를 때 입사하는 단일플라즈몬의 주파수에 따르는 단일플라즈몬의 수송결수

㉠) $J_a = 1, J_b = 0$, 1-3은 각각 $\Omega = 0.01, 0.05, 0.1$ 인 경우,

㉡), ㉢), $J_a = J_b = 1$, 1-3은 각각 $\Omega = 0.01, 0.05, 0.10$ 인 경우, ㉣) 1-3은 각각 $\Omega = 0.01, 0.05, 0.10$ 인 경우

맺 는 말

2개의 플라즈몬도파관사이에 놓인 V형량자점과 호상작용하는 단일플라즈몬의 전송 특성을 이론적으로 연구하였다. 결과 이런 혼합계에 입사하는 단일플라즈몬의 투과와 반사, 수송결수를 고전마당의 세기, 탈조량, 량자점과 도파관사이의 결합 등과 같은 파라메터들을 조종하여 변화시킬수 있다는것을 보여주었다. 단일플라즈몬경로기모형은 량자스위치, 량자경로기, 량자결합기와 같은 량자정보처리장치의 설계에 응용할수 있다.

참 고 문 헌

- [1] P. Kok et al.; Rev. Mod. Phys., **79**, 135, 2007.
- [2] S. Haroche; Rev. Mod. Phys., **85**, 1083, 2013.
- [3] J. T. Shen et al.; Phys. Rev., A **79**, 023837, 2009.
- [4] N. C. Kim et al.; Plasmonics, **10**, 605, 2015.
- [5] N. C. Kim et al.; Nanotechnology, **27**, 465703, 2016.

주체108(2019)년 9월 5일 원고접수

Single Plasmon Router with Two Plasmonic Waveguides and a Quantum Dot

Choe Hyok, Ko Myong Chol and Kim Nam Chol

We proposed a scheme for the single plasmon router with a V-type quantum dot(QD) sandwiched between two plasmonic waveguides. We investigated theoretically the transport properties of incident single plasmons in the hybrid system via the real-space approach. Our calculations show that the transmission and transfer rates of incident single plasmons in the proposed system could be controlled by adjusting such parameters, as the frequency of the classical field, detunings, couplings between QD and plasmonic waveguides. Our scheme could be used not only in the design of single plasmon router but also in the design of quantum switches and quantum couplers.

Keywords: router, single plasmon, transport, quantum dot, plasmonic waveguide