

리득매질나노공진기를 사이에 둔 플라즈몬 도파관사이의 능동결합

허금성, 한용하, 임성진

높은 연산능력을 가지는 나노광학소자를 개발하는데서 표면플라즈몬폴라리톤(SPP)의 위상과 세기를 능동적으로 조종하는 문제는 매우 중요하다. 현재 포톤 및 플라즈몬구조를 정밀설계하여 정확한 위상조종을 보장하려는 연구가 진행되고있다. 그러나 이 구조에서 고유하게 나타나는 위상차불안정성은 연산회로의 대조도를 떨어뜨리는 결함이 있다.[1] 한편 3차비선형효과를 리용한 능동결합도 제안되었다. 이 방법은 재료의 3차비선형감수율이 작은것으로 하여 포톤 및 플라즈몬도파관에서의 충분한 비선형결수를 얻자면 출력이 높고 호상작용길이 길어야 하는 부족점이 있다.[2] 높은 우량도를 가진 나노광학공진기는 일정한 광학적대역에서 단위길이당 호상작용을 공명증폭시킬수 있다. 그러나 나노플라즈몬공진기에서 표면플라즈몬모드는 금속손실이 큰것으로 하여 우량도의 크기가 제한을 받게 된다. 이러한 금속손실을 보상하고 고우량도플라즈몬공명을 실현해주는 리득매질의 도입이 이론적으로 제안되었으며 실험적으로도 증명되었다.[3] 또한 광학적위상을 측면결합리득매질공진기의 러기상태조종을 통하여 능동적으로 조종할수 있다는것도 제안되었다.[4]

본문에서는 리득매질나노공진기를 리용한 두 플라즈몬도파관사이의 능동결합의 새로운 방법을 제안하였다. 적당한 진동수비동기에서 러기속도를 조절하여 결합 및 투과표면플라즈몬폴라리톤사이의 위상차와 신호비를 임의로 얻을수 있다.

공진기를 사이에 두고 간접결합된 플라즈몬도파관모형은 그림 1과 같다.

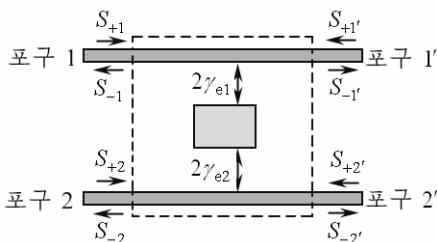


그림 1. 공진기를 사이에 두고 간접결합된
플라즈몬도파관모형

그림 1에서 공진기로 들어오고 나가는 파의 진폭을 S_{+1} , $S_{+1'}$, S_{+2} , $S_{+2'}$, S_{-1} , $S_{-1'}$, S_{-2} , $S_{-2'}$ 라고 표시하였다. 여기서 수자는 포구번호를 나타내며 입사파는 +로, 출구파는 -로 표기하였다.

그림 1에서와 같이 공진기를 사이에 두고 간접결합된 플라즈몬도파관구조의 스펙트르특성은 시간결합모드리론으로 해석할수 있다.[5]

각진동수가 ω 인 시간조화파가 포구 1로만 들어온다면($S_{+1'} = S_{+2} = S_{+2'} = 0$) 다음의 결과식을 얻을수 있다.

$$\left. \begin{aligned} S_{1'1} &= \frac{S_{-1'}}{S_{+1}} = \frac{j(\omega - \omega_0) + \gamma_0 - \gamma_g + 2\gamma_{e2}}{j(\omega - \omega_0) + \gamma_0 - \gamma_g + 2\gamma_{e1} + 2\gamma_{e2}} \\ S_{21} &= S_{2'1} = \frac{S_{-2}}{S_{+1}} = \frac{S_{-2'}}{S_{+1}} = \frac{-2\sqrt{\gamma_{e1}\gamma_{e2}}}{j(\omega - \omega_0) + \gamma_0 - \gamma_g + 2\gamma_{e1} + 2\gamma_{e2}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

여기서 ω_0 은 공진기의 공명진동수, γ_0 과 γ_g 는 공진기에서 내부손실에 의한 감쇠율과 리득매질에 의한 증폭률, γ_{e1} 과 γ_{e2} 는 각각 공진기와 두 도파관사이의 결합률이다.

이때 도파관결합파동과 투과파동사이의 복소진폭비는 다음과 같다.

$$\frac{S_{-1'}}{S_{-2'}} = \frac{\gamma_g - \gamma_0 - 2\gamma_{e2}}{2\sqrt{\gamma_{e1}\gamma_{e2}}} + j \frac{\omega_0 - \omega}{2\sqrt{\gamma_{e1}\gamma_{e2}}} \quad (2)$$

식 (2)에서 리득매질이 없거나 내부손실이 부분적으로 보상되는 손실상태인 $\gamma_g < \gamma_0$ 의 경우 $\text{Re}(S_{-1'}/S_{-2'}) < -\gamma_{e2}/\gamma_{e1}$ 이며 초과손실보상상태인 $\gamma_0 < \gamma_g < \gamma_0 + 2\gamma_{e1} + 2\gamma_{e2}$ 의 경우 $-\gamma_{e2}/\gamma_{e1} < \text{Re}(S_{-1'}/S_{-2'}) < \gamma_{e1}/\gamma_{e2}$ 이다. 또한 시간에 따라 공진기에너지가 급격히 증가하는 물리적으로 불가능한 상태인 $\gamma_g > \gamma_0 + 2\gamma_{e1} + 2\gamma_{e2}$ 의 경우 $\text{Re}(S_{-1'}/S_{-2'}) > \gamma_{e1}/\gamma_{e2}$ 이다.

식 (2)로부터 출력비뿐만아니라 결합 및 투과파사이의 위상차도 증폭률 γ_g 와 진동수비 동기 $\omega - \omega_0$ 을 변화시켜 조종할수 있다.

이와 같은 이론적예상에 기초하여 실제 도파관구조에서 능동결합에 대한 모의를 진행하였다. 도파관에서는 긴 플라즈몬수명과 고우량도플라즈몬공명특성으로 하여 좋은 플라즈몬금속으로 인정되고있는 은을 리용하였다.

InGaAsP를 채운 직각형나노공동을 사이에 두고 결합된 금속-유전체-금속(MIM)도파관구조의 능동결합은 그림 2와 같다.

그림 2에서 보는바와 같이 InGaAsP의 리득매질결수는 전기적 혹은 광학적으로 러기속도를 조절하여 정확히 변화시킬수 있다. 통신파장대역에서 능동결합을 실현하기 위하여 플라즈몬직각형공동의 크기를 높이 150nm, 너비 100nm로 정하였다.[4] 물리적모형에서의 결합특성은 진동수구역에서 막스웰방정식을 수값적으로 풀어 모의[4]하였으며 은의 유전률실함자료와 InGaAsP의 유전률실수부는 통신파장대역에서의 값인 $\text{Re}\epsilon_{\text{InGaAsP}}=11.38$ 을 리용하였다. 리득이행감수율 $\chi_g(\omega)$ 의 진동수의존성은 2준위근사로 고려하였다.[4]

물리적모형에서 투과 및 결합SPP사이 복소진폭비의 수값모의결과는 그림 3과 같다.

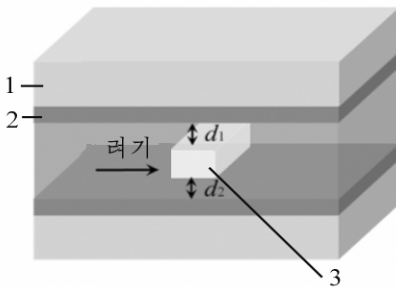


그림 2. InGaAsP를 채운 직각형나노공동을 사이에 두고 결합된 금속-유전체-금속(MIM)도파관구조의 능동결합
1-Ag, 2-공기, 3-InGaAsP

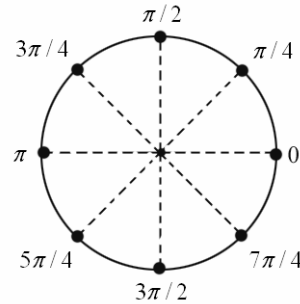


그림 3. 투과 및 결합SPP사이 복소진폭비의 수값모의결과
원형실선-이론적예상결과, 점-모의결과

식 (2)에서 진동수비동기 $\omega - \omega_0$ 과 리득결수 g 는 위상차가 $\exp(jn\pi/4)$ 로 되도록 모의하였다. 여기서 n 은 옹근수이다. 그림 3에서 보는바와 같이 모의결과(그림 3에서 점들)는 이론적예상결과(그림 3에서 원형실선)와 잘 일치하고있다.

맺는 말

리득매질나노공진기를 리용한 두 플라즈몬도파관사이의 능동결합에 대하여 연구하였다. 진동수비동기와 러기속도를 적당히 조절하여 도파관결합 및 투과SPP사이의 정확한 위상차조종을 실현할수 있다. 이러한 능동결합은 나노광학론리문, 방향성결합기, 여닫이 등 나노령역에서 빛의 조종에 응용할수 있다.

참고문헌

- [1] Yulan Fu et al.; Nano Lett., **12**, 5784, 2012.
- [2] G. P. Agrawal; Nonlinear Fiber Optics, Academic Press, 15~19, 2013.
- [3] Jinhong Xian et al.; Nanoscale, **6**, 13994, 2014.
- [4] Song Jin Im et al.; Scientific Reports, **6**, 18660, 2016.
- [5] H. Haus et al.; IEEE J. Quantum Elect., **28**, 205, 1992.

주체106(2017)년 7월 5일 원고접수

Active Coupling between Plasmonic Waveguides via in-between Gain-Assisted Nanoresonator

Ho Kum Song, Han Yong Ha and Im Song Jin

We studied the active coupling between plasmonic waveguides via in-between gain-assisted nanoresonator. Precise control of phase difference between coupled and transmitted surface plasmon polaritons can be performed by manipulating pumping rate at an appropriate frequency detuning. This coupling can be used in the control of light at nanoscale such as nano-optical logic gate, directional coupler, switching and so on.

Key words: surface plasmon polariton, waveguides, coupled resonators, phase modulator