

평판메타재료에서 파노공진에 대한 연구

장윤혁, 송금성

위대한 수령 김일성 동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《새로운 과학분야를 개척하며 최신과학기술의 성과를 인민경제에 널리 받아들이기 위한 연구사업을 전망성있게 하여야 합니다.》(《김일성전집》 제72권 292페이지)

물리학에서 파노공진해석이 가지는 중요한 의의의 하나는 비대칭스펙트럼이 많이 나타나는 물리적현상들을 파노모형에서 나타나는 축소된 에너지와 이행자 그리고 중요하게는 비대칭인자라는 간단한 세가지 인자들에 의하여 설명할수 있다는데 있다.[3]

논문에서는 표면전도도로부터 반사도와 투과도 및 흡수도를 계산하는 방법[1, 2]에 기초하여 그것들을 파노형식으로 유도하고 평판메타재료에서 브라이트모드와 다크모드가 광학적성질에 미치는 영향을 해석하였다.

다크모드와 결합된 브라이트모드로 이루어진 평판메타재료에서 외부마당과의 호상작용은 결합된 두진동자모형에 의하여 서술된다. 이러한 계에서 조화시간근사에서의 외부마당 $\tilde{E}_{inc}(\omega)$ 와 전기이중극 및 4중극모멘트들의 호상작용은 두진동자모형으로 쓸수 있다.

$$\left. \begin{aligned} -\omega^2 \tilde{p}(\omega) - i\omega\gamma_b \tilde{p}(\omega) + \omega_b^2 \tilde{p}(\omega) + \kappa_1 \tilde{q}(\omega) &= -(e^2/m) \tilde{E}_{inc}(\omega) \\ -\omega^2 \tilde{q}(\omega) - i\omega\gamma_d \tilde{q}(\omega) + \omega_d^2 \tilde{q}(\omega) + \kappa_2 \tilde{p}(\omega) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

여기서 \tilde{p} 와 \tilde{q} 는 브라이트모드와 다크모드의 분극전하, κ_1 과 κ_2 는 매개 진동자에서 다른 분극전하들과의 결합세기, γ_b 와 γ_d 는 진동자모형에서 브라이트모드와 다크모드의 고유감쇠결수, ω_b 와 ω_d 는 브라이트모드와 다크모드의 고유진동수이다.

표면전도도 σ_{se} 에 대하여 다음과 같은 식이 성립한다.[1]

$$\sigma_{se} = -\frac{i\varepsilon_0\omega\omega_b^2 D_d(\omega)}{D_d(\omega)D_b(\omega) - \kappa_1\kappa_2} \quad (2)$$

여기서 $D_b(\omega)$ 와 $D_d(\omega)$ 는 호상작용이 없는 경우 복사진동자의 세기로서 다음과 같다.

$$D_b(\omega) = \omega_b^2 - i\omega\gamma_b - \omega^2, \quad D_d(\omega) = \omega_d^2 - i\omega\gamma_d - \omega^2 \quad (3)$$

다음과 같은 량을 받아들이자.

$$S = \zeta\sigma_{se} = -\frac{i\eta\omega_b^2 D_d(\omega)}{D_d(\omega)D_b(\omega) - \kappa_1\kappa_2} \quad (4)$$

여기서 ζ 는 외부전자기파의 완전저항 즉 $\zeta = \mu_0\omega/k$ 이며 μ_0 은 진공의 투자률, k 는 외부전자기파의 파수, η 는 $\eta = \varepsilon_0\mu_0\omega^2 k$ 인 무분량이다.

수직으로 입사된 외부전자기마당에 의하여 려기된 브라이트모드와 다크모드로 이루어진 계에서 반사결수 및 흡수결수는 다음과 같다.[1]

$$r = -\frac{\zeta\sigma_{se}}{2 + \zeta\sigma_{se}}, \quad t = \frac{2}{2 + \zeta\sigma_{se}} \quad (5)$$

식 (4)를 리용하여 평판메타재료에서 정의된 반사도와 투과도, 흡수도의 파노형식을 유도하자.

먼저 다크모드의 고유공진점근방에서 반사도는 다음과 같다.[2]

$$R = |r|^2 = \left| \frac{S}{2+S} \right|^2 = \frac{\omega_b^4 |\eta|^2}{4} \left| \frac{D_d(\omega)}{D_d(\omega)D_{rb}(\omega) - \kappa_1 \kappa_2} \right|^2 \quad (6)$$

여기서 $D_{rb}(\omega)$ 는 변형된 복사전동자의 세기로서 다음과 같다.

$$D_{rb}(\omega) = \omega_b^2 - i(\omega\gamma_b + \eta\omega_b^2/2) - \omega^2 = \omega_b^2 - i\omega\gamma_{rb} - \omega^2 \quad (7)$$

이제

$$\varepsilon_{rd} = (\omega^2 - \omega_d^2 - \omega_d \Delta_{rd}) / \Gamma_{Trd} \quad (8)$$

는 다크모드의 변위된 공진점 즉 파노공진주파수근방에서 환산된 주파수이고

$$q_{rd} = -\frac{\text{Re} D_{rd}(\omega_d)}{\text{Im} D_{rd}(\omega_d)(1 + \Gamma_d / \Gamma_{dc})} = \frac{\omega_d \Delta_{rd}}{\Gamma_{Trd}} \quad (9)$$

를 다크모드의 파노공진주파수근방에서 스펙트럼의 비대칭인자라고 하면 다크모드의 파노공진주파수근방에서 반사도는 다음과 같은 파노형식으로 표시된다.

$$R_d = \frac{\omega_b^4 |\eta|^2}{4 |D_{rb}(\omega_d)|^2} \frac{(\varepsilon_{rd} + q_{rd})^2 + b_{rd}}{\varepsilon_{rd}^2 + 1} \quad (10)$$

여기서 $b_{rd} = \Gamma_d^2 / \Gamma_{Trd}^2$ 은 비복사모드의 손실에 의한 감쇠비를 나타내는 파라미터이다.

다음으로 S 를 리용하여 다크모드의 고유공진점근방에서 투과도에 대하여 보자.

$$T = |t|^2 = \left| \frac{2}{2+S} \right|^2 = \left| \frac{D_d(\omega)D_b(\omega) - \kappa_1 \kappa_2}{D_d(\omega)D_{rb}(\omega) - \kappa_1 \kappa_2} \right|^2$$

이제 새로운 환산된 주파수와 공진변위밀림 및 비대칭파라미터를 $\varepsilon_d = \omega^2 - \omega_d^2 - \omega_d \Delta_d / \Gamma_{Td}$, $\Delta_d = \kappa_1 \kappa_2 \text{Re} D_b(\omega_d) / (\omega_d |D_b(\omega_d)|^2)$, $q_d = \omega_d \Delta_d / \Gamma_{Td}$ 로 놓으면

$$T_d = \frac{|D_b(\omega_d)|^2}{|D_{rb}(\omega_d)|^2} \frac{(\varepsilon_{rd} + q_{rd})^2 + b_{rd}}{\varepsilon_{rd}^2 + 1} \frac{\varepsilon_d^2 + 1}{(\varepsilon_d + q_d)^2 + b_d}.$$

ε_d , q_d , b_d 를 각각 $\varepsilon_{md} = (\varepsilon_d + q_d) / \sqrt{b_d}$, $q_{md} = -q_d / \sqrt{b_d}$, $b_{md} = 1/b_d$ 로 변환시키면 투과도에 대한 식은 다음과 같은 2개의 파노공진의 적으로 변환된다.

$$T_d = \frac{|D_b(\omega_d)|^2}{|D_{rb}(\omega_d)|^2} \frac{(\varepsilon_{rd} + q_{rd})^2 + b_{rd}}{\varepsilon_{rd}^2 + 1} \frac{(\varepsilon_{md} + q_{md})^2 + b_{md}}{\varepsilon_{md}^2 + 1} \quad (11)$$

한편 브라이트모드의 공진점근방에서 반사도와 투과도를 보기 위하여 다크모드와의 결합에 의한 브라이트모드의 복사공진너비를 $\Gamma_{bc} = \kappa_1 \kappa_2 \text{Im} D_d(\omega_b) / |D_d(\omega_b)|^2$ 으로 놓으면 브라이트모드의 고유공진주파수근방에서의 전체 공진너비는 $\Gamma_{Trb} = \Gamma_{bc} - \text{Im} D_{rb}(\omega_b) = \Gamma_{bc} + \omega_b \gamma_b + \eta \omega_b^2 / 2$ 로 된다.

환산된 주파수와 브라이트모드의 고유공진주파수로부터의 밀림을 각각 다음과 같이 표시하자.

$$\varepsilon_{rb} = (\omega^2 - \omega_b^2 - \omega_b \Delta_b) / \Gamma_{Trb} \quad (12)$$

$$\Delta_b = -\frac{\kappa_1 \kappa_2 \text{Re} D_d(\omega_b)}{\omega_b |D_d(\omega_b)|^2} \quad (13)$$

이때 브라이트모드의 고유공진주파수근방에서 반사도는 다음과 같이 된다.

$$R_b = \frac{\omega_b^4 |\eta|^2}{4} \left| \frac{1}{-D_{rb}(\omega) - \omega_b \Delta_b + i\Gamma_{bc}} \right|^2 = \frac{\omega_b^4 |\eta|^2}{4\Gamma_{Trb}^2} \frac{1}{\varepsilon_{rb}^2 + 1} \quad (14)$$

이로부터 브라이트모드의 고유공진주파수근방에서 반사도는 대칭형식 즉 파노형식이 아니라 로렌츠형식이라는것을 알수 있다.

$\varepsilon_b = \omega^2 - \omega_b^2 - \omega_b \Delta_b / \Gamma_{Tb}$ 를 브라이트모드의 고유공진주파수근방에서 환산된 주파수, 전체 공진너비를 $\Gamma_{Tb} = \Gamma_{bc} - \text{Im} D_b(\omega_b) = \Gamma_{bc} + \omega_b \gamma_b$ 로 하고 새로운 변조된 감쇠파라미터를 $b_b = |\Gamma_{Tb} / \Gamma_{Trb}|^2$ 으로 하면 브라이트모드의 고유공진주파수근방에서 투과도는 다음과 같다.

$$T_b = \left| \frac{-D_b(\omega) - \Delta_b \omega_b + i\Gamma_{bc}}{-D_{rb}(\omega) - \Delta_b \omega_b + i\Gamma_{bc}} \right|^2 = \left| \frac{\Gamma_{Tb}}{\Gamma_{Trb}} \right|^2 \frac{\varepsilon_b^2 + 1}{\varepsilon_{rb}^2 + 1} = \frac{\varepsilon_{rb}^2 + b_b}{\varepsilon_{rb}^2 + 1} \quad (15)$$

식 (14), (15)로부터 브라이트모드의 반사도와 투과도에서 고유공진주파수의 밀림은 같으며 공진점근방에서 대칭형식이 나타난다는것을 알수 있다.

브라이트모드의 고유공진주파수근방에서 흡수도는 다음과 같이 표시된다.

$$A = T \text{Re} S = \eta \omega_b^2 \frac{\Gamma_{Tb}}{\Gamma_{Trb}^2} \frac{1}{\varepsilon_{rb}^2 + 1} \quad (16)$$

결합된 두진동자모형에 의하면 브라이트모드와 다크모드의 호상작용으로 일어나는 광학적성질들은 브라이트모드와 다크모드의 기하학적특징과 공간적배치에 의하여 결정된다. 브라이트모드와 다크모드의 기하학적특징은 이 모드들의 고유공진주파수를 결정하며 그것들의 공간적배치는 결합된 두진동자모형에서 결합상수들을 결정한다.

논문에서는 브라이트모드의 고유공진주파수와 다크모드의 고유공진주파수의 차 즉 탈조량($\Delta\omega = (\omega_d - \omega_b) / \omega_d$)에 의하여 일어나는 광학적특성을 고찰하였다.

브라이트모드와 다크모드사이의 호상작용세기와 탈조량에 따르는 반사도는 그림과 같다.

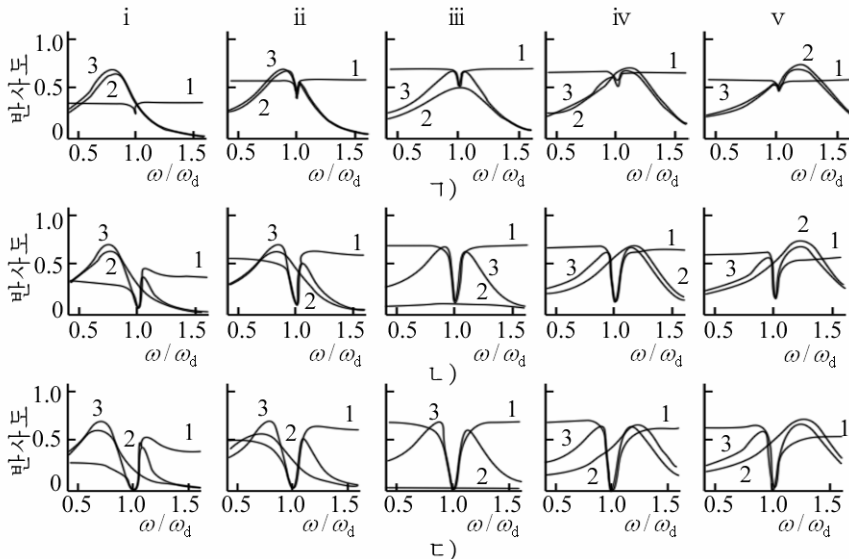


그림. 브라이트모드와 다크모드사이의 호상작용세기와 탈조량에 따르는 반사도
 1) - 3)는 브라이트모드와 다크모드사이의 호상작용세기가 각각 0.05, 0.15, 0.25인 경우,

i - v는 $\Delta\omega$ 가 각각 -0.2, -0.1, 0, 0.1, 0.2인 경우,

1-다크모드, 2-브라이트모드, 3-결합계

그림에서 보는바와 같이 브라이트모드와 다크모드사이의 호상작용세기가 작을 때 반사도의 형태는 전반적으로 결합이 없을 때 브라이트모드의 반사도형태를 가지며 호상작용세기가 커져도 다크모드의 공진점근방을 제외하고는 브라이트모드의 형태를 거의 유지한다.

호상작용세기가 커지는데 따라 다크모드의 공진점근방에서 반사도의 형태는 파노형식에 의하여 지배되며 탈조량이 령에 가까와지면 반사도는 대칭으로 되면서 굽이 생긴다. 이것은 다크모드의 고유공진주파수근방에서 브라이트모드와의 호상작용이 매우 강해진다는 것을 의미한다.

맺 는 말

결합된 두진동자모형에 기초하여 평판메타재료에서 브라이트모드와 다크모드가 광학적특성에 주는 영향을 해석하였다. 또한 브라이트모드와 다크모드의 고유공진주파수근방에서 반사도와 투과도, 흡수도의 파노형식을 유도하였다.

참 고 문 헌

- [1] P. Tassin et al.; Phys. Rev. Lett., **109**, 187401, 2012.
- [2] B. Gallinet et al.; Nano Lett., **13**, 497, 2013.
- [3] B. Gallinet et al.; Phys. Rev., **B 83**, 235427, 2011.

주체106(2017)년 7월 5일 원고접수

On the Fano Resonance in Planar Metamaterials

Jang Yun Hyok, Song Kum Song

We studied Fano resonance in planar metamaterials on the basis of radiating two-oscillator model. We deduced the Fano type formulae of reflectance, transmittance and absorbance in the planar metamaterials. Based on these formulae, we analyzed the role of bright mode and dark mode in planar metamaterials.

Key words: metamaterial, Fano resonance, bright mode, dark mode