

두가지 성분의 구형나노립자들이 분산된 액정재료에서 유효매질구각에 대한 연구

박현철, 송금성, 리철원

최근 비등방적메타물질을 리용하는 산란이 없이 빛을 투과하는 유효매질구각에 대한 연구[1-3]가 많이 진행되고있다.

유전률의 공간적분포만을 변화시키는 방법[3]과 심-구각구조의 광학적응답을 리용하여 분극률을 령으로 하는 방법[4], 네마틱크액정속에 심-구각구조의 나노구들을 분산시키고 액정의 비등방성을 리용하여 기반재료인 액정의 정상굴절률을 변화시키는 방법[5, 6]으로 산란이 없이 빛을 투과하는 유효매질구각들이 실현되었다.

우리는 구형폴라리톤 및 플라스몬나노립자들을 분산시킨 원기동형액정메타물질을 리용한 적외선대역에서 산란이 없이 빛을 투과하는 유효매질구각에 대하여 연구하였다.

두가지 성분의 구형나노립자들이 분산된 액정메타물질에서 플라스몬립자의 채움률을 변화시킴으로써 유효매질구각에 요구되는 유전률과 투자률에 대한 광학적변환조건을 만족시킬수 있다.

이 재료에서 유효매질파라미터들은 두 구들의 성분과 크기, 채움률, 네마틱크액정분자의 긴축이 입사빛의 방향과 이루는 각 θ 에 의존하는데 채움률을 변화시켜 유효매질파라미터들을 조종하는것이 현실적으로 가능하다.

폴라리톤립자와 플라스몬립자가 분산된 액정메타물질의 유효매질파라미터의 공진거동을 얻기 위하여 적외선대역에서 LiTaO_3 과 같은 폴라리톤립자와 작은 부의 체적유전률을 가지는 Ge와 같은 반도체재료를 리용하였다.

폴라리톤재료의 체적상대유전률은 일반적으로 로렌츠모형으로, 플라스몬나노립자의 상대유전률은 드루데모형으로 선정되었다.

한가지 종류의 구형나노립자들이 분산된 액정재료의 유효유전률과 유효투자률은 확장된 막스웰-가네트공식에 의하여 계산할수 있다.

서로 다른 종류의 나노구들로 이루어진 두성분재료에 대하여 유효매질파라미터들은 주위매질의 소멸에 비한 임의의 단위포의 평균소멸이 령이라는 조건으로부터 계산할수 있다.

두가지 종류의 나노구들이 분산된 액정재료의 유효유전률과 유효투자률은 다음과 같다.

$$\sum_{i=1}^2 C_i \frac{\epsilon_3 - \epsilon_{\text{eff}} + [3j/(2x_{3i}^3)]a_{1i}f_{12}(2\epsilon_3 + \epsilon_{\text{eff}})}{\epsilon_3 + 2\epsilon_{\text{eff}} + [3j/(2x_{3i}^3)]a_{1i}f_{12}(\epsilon_3 - \epsilon_{\text{eff}})} = 0 \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^2 C_i \frac{\mu_3 - \mu_{\text{eff}} + [3j/(2x_{3i}^3)]b_{li}f_{12}(2\mu_3 + \mu_{\text{eff}})}{\mu_3 + 2\mu_{\text{eff}} + [3j/(2x_{3i}^3)]b_{li}f_{12}(\mu_3 - \mu_{\text{eff}})} = 0 \quad (2)$$

여기서 $f_{12} = f_1 + f_2$ 는 구의 전체 채움률, C_1 과 $C_2 = 1 - C_1$ 은 각각 1, 2성분의 구형립자들의 상대농도, $f_i = \frac{4\pi}{3} N_i r_i^3$, $i=1, 2$ 는 분산된 i 립자의 체적채움률, N_i 는 립자수밀도, $x_{3i} = \sqrt{\epsilon_3 \mu_3} \frac{\omega r_i}{c}$, ϵ_3, μ_3 은 액정기반의 상대유전률과 상대투자률, r_i 는 폴라리톤 및 플라스몬립자들의 반경, a_{li}, b_{li} 는 산란행렬의 전기이중극과 자기이중극에 대응하는 결수들, $\epsilon_{\text{eff}}, \mu_{\text{eff}}$ 는 유효유전률과 유효투자률이다.

우리는 두가지 종류의 구형나노립자들이 분산된 액정에 기초하여 적외선대역에서 산란이 없이 전자기파를 투과하는 원기둥형유효매질구각을 설계하였다.

나노립자가 분산된 액정메타물질들로 채워진 원기둥형네마틱크액정세포에서 네마틱크분자들의 배향축이 xy 평면에 있다면 가로자기적편극을 가진 파동은 네마틱크액정기반에 이상파로 입사한다.

원기둥형유효매질구각에 대하여 $(\mu_{\text{eff}})_z(\epsilon_{\text{eff}})_\theta$ 와 $(\mu_{\text{eff}})_z(\epsilon_{\text{eff}})_r$ 는 다음과 같은 조건들을 만족시켜야 한다.

$$(\mu_{\text{eff}})_z(\epsilon_{\text{eff}})_r = \left(\frac{b}{b-a} \right)^2 \left(\frac{r-a}{r} \right)^2 \quad (3)$$

$$(\mu_{\text{eff}})_z(\epsilon_{\text{eff}})_\theta = \left(\frac{b}{b-a} \right)^2 \quad (4)$$

여기서 a, b 는 원기둥형유효매질구각의 내부반경과 외부반경, 첨자 z, r, θ 는 원기둥자리표에 대응된다.

$\epsilon_{\text{eff}}, \mu_{\text{eff}}$ 의 텐소르성분들은 ϵ_3 의 대응하는 텐소르성분들을 리용하여 계산하였다.

네마틱크액정분자들의 비등방적유전률텐소르 ϵ_3 은 $\epsilon_r = \epsilon_z = \epsilon_\perp = 1.98$, $\epsilon_\theta = \epsilon_\parallel = 4$ 를 성분으로 가지는 대각행렬이다.

우리의 목적은 두성분구형나노립자들이 분산된 액정재료에서 식 (3)과 (4)를 만족시키는 구들의 반경에 따르는 유효매질파라미터들을 찾는것이다.

$(\epsilon_{\text{eff}})_\theta$ 는 유효매질구각안에서 상수여야 하며 $(\epsilon_{\text{eff}})_r$ 는 식 (3)에 따라 r 의 함수로 변하여야 한다.

우리가 리용한 LiTaO_3 과 Ge 의 가로광학포논주파수와 플라스마주파수는 $\omega_T = \omega_p = 2\pi \times 4.25 \times 10^{12} \text{ rad/s}$ 로 설정하였다.

폴라리톤립자와 플라스몬립자의 공진특성을 리용하기 위하여 동작파장은 $\lambda_0 = 79.3 \mu\text{m}$ 로 설정하였다.(주파수로 보면 $\omega = 0.9\omega_p$) 이때 유효매질구각의 공간적크기 a 와 b 는 유효매질리론으로부터 계산한 유효매질파라미터들과 내부경계 즉 매질구역의 반경 a 를 설정한데 기초하여 식 (3), (4)로부터 계산한다.

LiTaO_3 폴라리톤립자와 구형Ge플라즈몬립자들이 분산된 네마틱액정결정의 유효매질 파라미터 $(\epsilon_{\text{eff}})_r$, $(\epsilon_{\text{eff}})_\theta$ 는 식 (1)과 (2)에서 $\epsilon_3 = \epsilon_r$, $\epsilon_3 = \epsilon_\theta$ 로 하여 계산하였다.

플라즈몬립자에 대하여 채움률 f_2 를 0.02부터 0.04까지 변화시키면서 유효유전률과 유효투자률을 계산하였다.

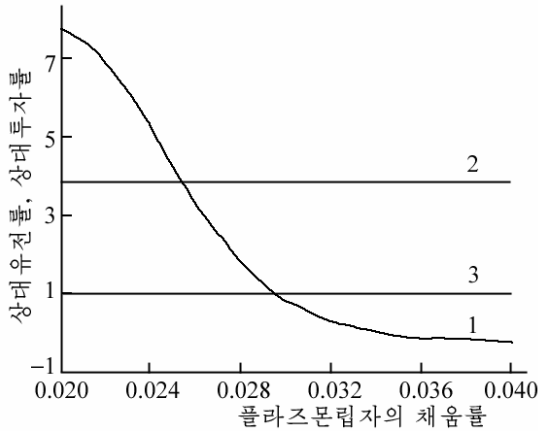


그림 1. 플라즈몬립자의 채움률에 따른 유효매질파라미터

$$1 - (\epsilon_{\text{eff}})_r, 2 - (\epsilon_{\text{eff}})_\theta, 3 - (\mu_{\text{eff}})_z$$

이것을 만족시키는 플라즈몬립자의 채움률은 $f_2 = 0.034$ 이다. 원기둥의 외부경계에서 유효유전률의 동경성분값은 식 (3)으로부터 $(\epsilon_{\text{eff}})_{r=b} = 1.967$ 이며 이것을 만족시키는 채움률은 $f_2 = 0.028$ 이다. 계산에서 리용한 폴라리톤립자의 반경은 $r_1 = 1.2\mu\text{m}$ 이며 플라즈몬립자의 반경은 $r_2 = 0.5\mu\text{m}$ 이다.

적외선대역에서 산란이 없이 전자기파를 투과하는 유효매질구각설계의 정확성을 평가하기 위하여 유한요소법을 리용하였다.

가로자기(TM)파에 대한 유효매질구각에서 자기마당분포는 그림 2와 같다.

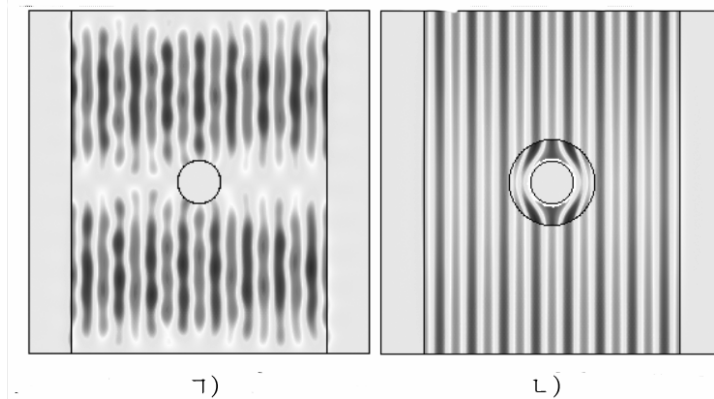


그림 2. TM파에 대한 유효매질구각에서 자기마당분포
1) 유효매질구각이 없을 때, 2) 유효매질구각이 있을 때

유효매질구각안에 감추어진 대상은 반경 a 를 가진 리상적인 금속원기둥이다.

그림 2의 ㄱ)는 유효매질구각이 없을 때 금속원기둥주위에서 자기마당의 z 성분분포를 보여준다.

그림 2의 ㄴ)는 유한요소법을 리용한 리상적인 유효매질구각의 모의에 대한 자기마당의 z 성분을 보여준다.

입사파는 계산구역의 왼쪽으로부터 입사하는 파장이 $\lambda_0 = 79.3\mu\text{m}$ 인 TM편극된 평면파이다. 왼쪽과 오른쪽 경계들은 리상정합층(PML)들로 이루어졌고 바닥과 꼭대기는 리상전기전도체(PEC)이다.

금속원기둥안에서는 자기마당이 령이다. 임의의 대상은 구역의 어느쪽으로도든 마당의 영향을 받음이 없이 구각의 내부에 놓일수 있다. 진행파는 모의구역의 모든 경계들에서 흡수된다.

구형나노립자들이 분산된 액정구각이 없을 때 원기둥의 앞과 뒤에서 산란파가 생기지만 유효매질구각의 존재하에서 파면은 보다 작은 섭동을 가지고 금속원기둥구역주위를 흐른다.

두 경우들에 대한 정량적인 비교를 통하여 연구된 유효매질구각이 적외선대역에서 전자기파의 산란을 매우 작게 한다는것을 확증하였다.

맺 는 말

계는 폴라리톤 및 플라스몬립자들을 가진 액정으로 이루어졌다.

유효매질파라미터들은 플라스몬립자들의 서로 다른 채움률에 대하여 r 에 따라 변한다.

유한요소법계산은 그러한 유효매질구각의 존재로 숨긴 대상으로부터의 산란이 제한된다는것을 보여주었다.

참 고 문 헌

- [1] Z. Liu et al.; Science, **315**, 1686, 2007.
- [2] J. B. Pendry et al.; Science, **312**, 1780, 2006.
- [3] D. Schurig et al.; Science, **314**, 977, 2006.
- [4] W. Cai et al.; Nat. Photonics, **1**, 224, 2007.
- [5] A. Alu et al.; Phys. Rev. Lett., **100**, 113901, 2008.
- [6] G. Pawlik et al.; Optics Letters, **37**, 1847, 2012.

주제 105(2016)년 3월 5일 원고접수

On Effective Medium Cylindrical Shell in Two Types of Spherical Nanoparticle Dispersed Liquid Crystal Metamaterial

Pak Hyon Chol, Song Kum Song and Ri Chol Won

The system of liquid crystal metamaterial consists of liquid crystal with polariton and plasmon particles. The effective media parameters vary with r according to different values of the filling factor of plasmon particles. Finite element calculations show that scattering from the hidden object is limited in the presence of the such cloak device.

Key words: polariton particle, plasmon particle, liquid crystal metamaterial