

2차원 광자결정 도파로에서 결합모드의 결합특성

조대희, 박혜영, 기철식**, 임한조
아주대학교 전자공학부, 전자통신 연구원**

Coupling characteristics of localized modes of line defects in two-dimensional photonic crystals

Dae-Hee Cho, Hye-Young Park, Chul-Sik Kee**, H. Lim
Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou University, ETRI**

Abstract - We have investigated the coupling characteristics of localized modes of line defect, i.e., guided modes, in photonic crystals. The parity of the coupled guided modes is not conserved when the distance between the line defects changes. By comparing the coupling characteristics of localized modes without the oscillatory nature such as cavity modes of metallic Fabry-Parot cavities with those of localized modes in photonic crystals, we confirmed that this parity nonconservation is attributed to the oscillatory nature of the evanescent waves of localized modes in photonic crystals.

1. 서 론

광자결정은 인공적으로 유전율이 다른 물질을 주기적으로 배열한 구조인데, 이런 광자결정에 전자기파를 입사하면 특정한 주파수 영역에서는 전자기파가 투과하지 못하고 모두 반사되어 버리는데, 그런 주파수 영역을 광자띠간격(Photonic band gap: PBG)이라 한다[1]. 광자결정에 점결합이나 선결합을 주면 광결정의 주기적인 특성이 깨져서 광자띠간격내에 결합모드가 생기게 된다. 이런 결합모드에서 점결합(선결합)은 공진기(도파로)로 사용될 수 있다[2]. 우리는 더욱이 결합의 모양이나 크기를 바꿔서 결합모드의 주파수를 조절 할 수 있다. 이런 결합 모드의 조절은 광도파로나 광 공진기 같은 소자의 적용에 중요한 역할을 한다[3].

기존의 유전체나 광섬유를 이용한 광의 도파는 기본적으로 내부 전반사를 이용한 것이다. 이 때문에 도파되는 방향이 급하게 바뀌는 경우 도파되는 광의 에너지는 도파로를 따라 대부분 전달되지 못하고 외부로 손실되어 버린다. 하지만 광결정 도파관은 내부 전반사가 아닌 국소결합에 강하게 구속되는 결합모드를 이용하기 때문에, 굴곡이나 심한 꺾임이 있다고 하더라도 광을 효과적으로 전달할 수 있다. 이런 특성은 광소자 설계시 매우 중요하다. 최근에는 광결정 공진기와 도파로를 이용하여 여러 파장의 광들 중에서 특정 파장의 광만 공진기와 도파로간의 상호작용을 이용해 다른 도파관으로 dropping 하거나 수직방향으로 필터링 할 수 있음을 보여주었다.

점결합의 공진모드(cavity mode)와 선결합의 전파모드(guided mode)간의 상호작용은 각각의 소멸파(evanescent wave)가 증첩하여 생기는데, 이런 상호작용으로 인하여 하나의 결합모드가 갈라져서 두 개의 결합모드가 광자띠간격 내에 생성된다. Boscolo는 최근에 2차원 광결정에서 두 개의 선결합들간의 상호작용에 의해 갈라진 2개의 결합모드의 패리티(parity)가 첫 번째(두번째) 전파모드는 항상 우(기) 패리티인 것을 발표하였는데[4], 최근에 두 개의 점 결합들간의 상호작용에서 점결합간의 거리가 바뀔때 따라서 패리티가 변하는 것을 조사하였다[5]. 이와 같이 두 개의 점결합이 결합된 구조에

서 패리티 모드가 바뀌는 이유는 광자결정의 점결합에 국소화된 전자기파의 소멸파가 파가 진동하면서 감소하기 때문이다.

2. 본 론

이 논문에서 우리는 2차원 광자결정에서 선결합간의 상호작용에서도 선결합간의 거리가 바뀔때 따라서 패리티 모드가 바뀌는 것을 보이고, 그 이유에 대하여 자세하게 설명 하겠다. 선결합이 결합된 구조에서 첫번째(두번째) 전파모드의 필드 분포와 평면파의 전파특성을 같이 비교해서 전파모드의 패리티가 변하는 것을 다시 한번 확인하였다. 우리는 또한 Ag metal 패브리-페롯 공진기가 결합된 구조에서 공진모드간의 상호작용의 특성을 관찰하여, 광결정에서 패리티가 보존되는 않는 이유는 광결정에서 결합에 국소화된 전자기파의 소멸파가 진동하면서 감소하기 때문이라는 사실을 명확하게 하였다. 메탈 패브리-페롯 공진기가 결합된 구조에서 공진모드의 패리티는 공진기사이의 간격이 변하여도 공진모드의 패리티는 광자결정에 선결합이 결합된 전파모드와는 반대로 변하지 않는다. 이런 차이점은 소멸파의 모양이 다르기 때문에 기인하기 되는데, 광결정에서 국소화된 전자기파의 소멸파는 진동하면서 감소하는 반면에, 메탈 패브리-페롯 공진기에서의 소멸파는 진동하지 않고 감소하기 때문이다.

2.1 계산 방법

이논문에서는 TM 모드의 결합 특성을 조사하였고, TM 모드는 dielectric rod가 공기중에 서있는 2D 광결정 구조에서, rod와 평행한 방향으로 E-field가 있는 모드이다. 하지만 우리가 광결정에서 보는 상호작용 특성은, 광결정에서 일어나는 일반적인 특성이고 편광이나 광결정 구조와는 관계없는 현상인데, 그 이유는 선결합의 전파모드의 일반적 특징은 광결정 모양이나 편광에 영향을 받지 않기 때문이다. 그림1은 dielectric rod가 공기중에 서있는 2D 광결정 구조에서 선결합이 결합된 FDTD 계산 방법의 그림을 보여주는 것이다. dielectric rod의 유전율은 11.56이고, 반지름은 $0.2a$ 이고, 격자상수는 a 인 구조이다. 그림1에서 둘러싸고 있는 벽은 전자기파를 흡수한다고 가정하는 부분이다. 이논문에서 두 개의 선결합이 결합된 구조에서 구한 전파특성은 FDTD(finite difference time domain) 방법을 이용하였고, 경계조건은 PML(perfect matched layer)이다[6]. 또한 source는 평면파(plane wave)라고 가정하였다. 평면파 source는 기 모드와는 symmetry가 맞지 않아서 기모드는 여기되지 않기 때문에 우 모드만이 전파되게 된다. 두 개의 선결합이 결합된 구조의 결합 주파수와 field 분포는 평면파 전개(plane wave expansion) 방법을 이용하였다[7].

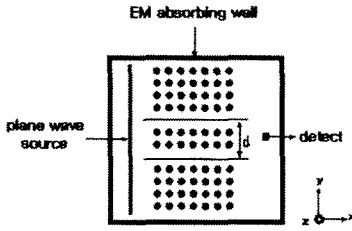


그림 1. 2차원 광결정에서 선결합이 결합된 구조의 FDTD계산 구조

2.2 2차원 광자결정 선결합의 결합특성

그림 2는 선결합이 결합된 광자결정에서 평면파가 입사 되었을때의 투과특성과 전파모드의 분포특성(band structure)을 보여주는 그림이다. 그림 2-a는 선결합간의 간격이 $d=2a$ 인 구조이고, 그림 2-b는 $d=3a$ 일때의 투과특성과 밴드구조의 결과이다.

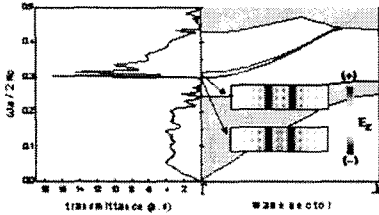


그림 2 (a) $d=2a$

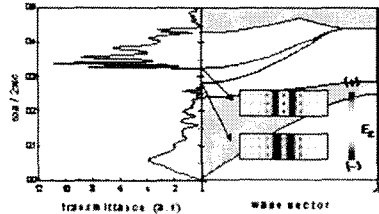


그림 2 (b) $d=a$

그림 2. $d=2a, a$ 에서의 투과특성과 밴드곡선

2차원 광자결정에 하나의 선결합이 있을때는 하나의 전파모드만이 광자띠간격 내에 생성되지만, 2개의 선결합이 결합된 경우에는 2개의 선결합 전파모드간의 상호작용으로 인하여 하나의 전파모드가 갈라져서 그림 2(a,b)에서 보는 것처럼 광자띠간격 내에 2개의 전파모드가 생성되는 것을 볼 수 있다. 평면파 source는 기모드는 여기 시키지 못하므로, 투과특성에서 $d=3a$ 에서는 우모드인 첫 번째 모드에서부터 투과가 일어나고, $d=2a$ 에서는 우모드인 두 번째 모드부터 투과되고 있다. 이와 같은 투과특성은 결합모드(전파모드)의 패리티가 두 개의 선결합간의 간격이 변하게 됨에 따라 바뀌는 것을 보여주고 있다. 필드 분포는 감마 점에서의 두 개의 두 개의 전파모드의 E-field 분포인데, $d=3a$ 에서 $2a$ 로 변하면 첫 번째 모드가 우모드에서 기모드로 패리티가 변하는 것을 보여주고 있다. 투과특성과 E-field 분포의 두 개의 결과에서 보는 것처럼 모두 간격 d 가 가깝게 따라서 패리티가 변하고 있는 사실을 보여주고 있다. C. S. Kee *et. al.* 논문에서 제안 하였듯이 점결합이 결합된 구조에서 패리티가 보존되지 않는 것과 마찬가지로 선결합이 결합된 구조에서도 패리티가 보존되지 않는 이유는 국소화된 전자기파의 소멸파가 진동하기 때문에 나타나는 현상이다.

2.3 Ag Metal 패브리-페롯 공진기의 결합특성

소멸파가 진동하면서 감소하는 구조의 상호작용과 소멸파가 진동하지 않고 감소하는 구조의 상호작용을 비교하기 위해서, Ag metal 패브리-페롯 공진기의 공진모드의 특성을 알아보았다. Ag metal 패브리-페롯 공진기의 공진모드는 소멸파가 진동하지 않고 단순히 감소한다. 이런 공진기 두 개를 결합시켜서 상호작용의 특성을 알아보았다. Ag metal 패브리-페롯 공진기 2개를 결합시킨 구조에서, Ag 두께를 충분히 얇게하면 공진모드의 소멸파가 증첩되어 공진모드간의 상호작용이 일어나게 된다. 상호작용의 세기는 결합된 메탈 패브리-페롯 공진기의 가운데 메탈 두께에 관련된다. 즉 가운데 메탈의 두께가 두꺼워 질수록 상호작용의 세기는 작아진다. 그림 3(a)는 Ag metal 패브리-페롯 공진기가 결합된(공기/Ag(30nm)/MgF₂(200nm)/Ag(d)/MgF₂(200nm)/Ag(30nm)/공기) 구조에서 $d=20, 25$ nm일때 평면파가 수직으로 입사된 투과특성이다. 그림 3(b)는 투과특성에서 $d=20, 25$ nm에서의 낮은 공진주파수의 field 분포이다. 투과특성의 계산 방법은 불변 끼워넣기(invariant imbedding) 방법을 이용하였다[8]. MgF₂의 유전율은 1.9이고, 주파수에 관계된 Ag의 유전율은 Drude 유전 방정식인 $\epsilon = 1 - \omega^2/\omega_p$ 를 이용하였다.

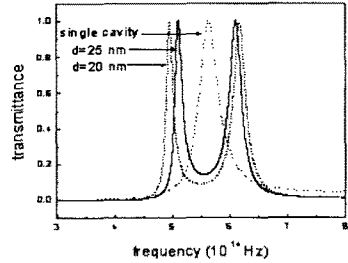


그림 3(a) Ag metal 공진기가 결합되었을때의 투과 특성

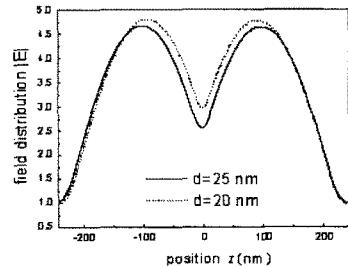


그림 3(b) 투과특성에 첫 번째모드의 필드 분포

그림3. Ag metal 공진기가 결합된 구조에서의 투과 특성과 필드분포

점선은 하나의 Ag metal 패브리-페롯 공진기의 투과특성이다. 이 공진모드의 주파수는 5.62×10^{14} Hz이다. 2개의 Ag metal 패브리-페롯 공진기가 결합된 경우에는 공진모드의 주파수가 갈라져서 두 개의 공진 주파수를 갖는다. $d=25, 20$ nm일 때 공진모드간의 상호작용으로 두 개의 공진모드가 생길 때, $d=25$ nm에서 갈라지는 정도가 더 적은 것을 볼 수 있다. 이와 같은 현상은 d 의 간격이 적을수록 소멸파의 증첩이 많아져서 상호작용의 세기가 커지기 때문이다. 이와 같은 상호작용 특성은 광자결정에서 두 개의 선결합간의 상호작용과 매우 유사하다. 하지만, 결합된 공진기 모드의 전달 특성에서 $d=25, 20$ nm에서 낮은 모드의 필드 분포를 보면, 그림 3(b)에서 보는

것 처럼 두 개의 모드 다 우 모드 인 것을 볼 수 있다. 광결정에서 선결합 간의 거리를 바꿈에 따라서 패리티가 변하는 것과 달리, 두 개의 Ag metal 패브리-페롯이 결합된 구조에서는 가운데 두께를 변함에 따라서 패리티가 변하지 않는다. 또한 두 번째 모드의 패리티가 모두 기 모드인 것을 확인 하였다. 이와 같은 결과는 소멸파가 진동하지 않고 단순 감소하는 모드의 상호작용은 패리티가 보존되는 것이다.

3. 결 론

지금 까지 우리는 두 개의 선결합이 결합된 구조에서 선결합 간의 거리를 바꿈에 따라서 패리티가 바뀌는 것을 보였다. 이와 같이 광결정에서 선결합간의 상호작용으로 인하여 갈라진 두 개의 모드의 패리티가 바뀌는 이유는 광결정에 국소화된 전자기파의 소멸파가 진동하면서 감소하기 때문에 나타나는 현상인 것을 확인하였다. 이와 같은 사실을 소멸파가 단순 감소하는 구조인 두 개의 Ag metal 패브리-페롯 공진기가 결합된 구조에서 공진 모드의 패리티가 바뀌지 않는 것을 확인 하여 결과를 정확히 알 수 있었다.

[참 고 문 헌]

[1] E. Yablonovitch, "Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics", *Phys. Rev. Lett.*, 58, 2059, 1987
 [2] R. D. Meade, A. Devenyi, J.D.Joannopoulos, O.L.Alerhand, D.A.Smith, and K.Kash, "Novel applications of photonic band gap materials:Low-loss bends and high Q cavities", *J. Appl. Phys.*, 75, 4753, 1994
 [3] O. Painter, R.K.Lee, A.Scherer, A.Yariv, J.D.O'Brien, P.D.Dapkus, and I.Kim, "Two-Dimensional Photonic Band-Gap Defect Mode Laser", *Science*, 284, 1819, 1999
 [4] S. Boscolo, M.Midrio, C.G.Someda, "Coupling and Decoupling of Electromagnetic Waves in Parallel 2-D Photonic Crystal Waveguides", *J. Quantum Electron.*, 38, 47, 2002
 [5] C.S.Kee, H.Lim, and J.Lee, "Coupling characteristic of localized photons in two-dimensional photonic crystals", *Phys. Rev. B*, 67, 073103, 2003
 [6] J. P. Berenger, "A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves", *J. Comput. Phys.*, 114, 185, 1994
 [7] R.D.Meade,A.M.Rappe, K.D.Brommer, J.D.Joannopoulos, "Accurate theoretical analysis of photonic band-gap materials", *Phys. Rev. B*, 48, 8434, 1993
 [8] K. Kim, "Reflection coefficient and localization length of waves in one-dimensional random media", *Phys. Rev. B*, 58, 6153, 1998