

FDTD 시뮬레이션을 이용한 2차원 광자결정 구조의 광자밴드갭 특성 연구

여종빈, 윤상돈, 이현용
전남대학교

A study on the photonic bandgaps in two-dimensional photonic quasicrystals by FDTD simulation

Jong-Bin Yeo, Sang-Don Yun, Hyun-Yong Lee
Chonnam National Univ

Abstract : 본 논문에서는 우수한 광학 특성으로 활발히 연구되고 있는 광자결정(PCs)과 이를 변형시킨 광자준결정(PQCs) 구조를 설계하고 특성을 평가, 비교하였다. 특성 평가는 cubic 및 hexagonal 기본격자의 PCs와 8-fold PQC 구조를 비교하였으며 각각 동일한 충진률, 동일한 굴절률 차이의 조건을 갖도록 설계하여 구조에 따른 PBGs 변화를 살펴보았다. 계산 방법은 Maxwell 방정식을 이용한 finite difference time domain (FDTD) 전산모사법을 사용하였다. 본 연구의 결과로부터 잘 설계된 2차원 PQCs는 낮은 굴절률차이(Δn)의 물질 구조에서도 완전한 광자밴드갭(photonic bandgaps: PBGs)을 가질 수 있다는 것을 확인하였다. 본 연구진은 다중회전 홀로그래피 방법(multi-rotational holographic method)을 이용하여 설계된 PQCs를 완벽하게 재현하려는 공정을 진행 중에 있다.

Key Words : 2차원 광자결정, 광자준결정, FDTD, 완전 광자밴드갭, 다중회전 홀로그래피법

1. 서론

최근 photonics 분야에서 특정주파수 영역에서의 광자밴드갭(photonic bandgaps: PBGs)을 갖는 광자결정(photonic crystals: PCs)에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. PBGs 범위 내의 주파수를 갖는 전자기파 (혹은 광파)의 전파를 금지시키는 특징을 갖는 PCs는 광전자 공학과 광 통신등과 같은 많은 응용분야에 사용되어질 것이라 예상된다. 이러한 PCs의 형태학적 특징은 큰 유전율차이 또는 굴절률차이(Δn)를 갖는 재료들의 주기적인 배열이다. 하지만 기존의 광 통신 소자와 접목하기 위해서는 보다 낮은 Δn 을 갖는 재료들을 이용한 구조체를 필요로 한다.

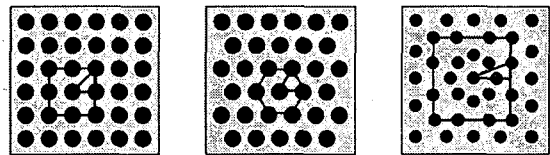
이를 해결하기 위해 PCs를 구조적으로 변형시킨 광자준결정(photonic quasi-crystals: PQCs) 구조의 연구가 진행되고 있다. PQCs는 short-range에서는 비주기 구조이면서 long-range에서는 주기 구조를 띄는 결정학에서의 quasi-crystal과 유사한 개념으로 높은 회전대칭성(rotational symmetry)을 갖는 구조로써 다양한 결함모드(defect mode)의 도입이 가능하며 복합적인 광학 특성을 갖는 광학 소자로의 응용이 가능하리라 예측된다.

본 연구에서는 2차원 PQC 구조에서의 PBGs 특성을 조사하기 위하여 FDTD (finite difference time domain) 시뮬레이션법을 이용하여 광학특성을 평가하였다. 비교 평가를 위하여 R_Soft라는 프로그램을 이용하여 2D PCs와 PQCs 구조의 TE, TM 모드 전파 특성을 계산하여 예측하고 논의하는 연구를 진행하였다.

2. 실험

2.1 구조물 형태의 모델링

본 연구에 사용된 구조는 cubic 및 hexagonal 단위셀 구조를 갖는 2종류의 PCs와 8-fold 대칭성을 갖는 PQCs를 모델링 하였으며 모델링한 구조의 개략도를 그림1에 보였다. 시뮬레이션은 그림 1의 내부에 보이는 사각(또는 육각) 모양의 단위셀을 반복하여 확대시키는 방법을 이용하였다. 2종류 PCs는 병진 대칭성과 함께 회전 대칭성을 갖고 있고, PQCs는 병진 대칭성은 없지만 높은 회전 대칭성을 갖고 있다.



Cubic PCs Hexagonal PCs 8-fold PQCs

그림 1. 모델링에 이용된 3종류 격자구조의 개략도

2.2 변수 인자 설정

시뮬레이션을 위한 구조물의 조건으로는 패턴 주기 (A)를 1로 잡았을 때 기본 구조에서 패턴의 반지름(r)은 0.29, 굴절률 차이(Δn)는 0.54로 구조를 설계하였다. 시뮬레이션에서의 변수는 r 과 Δn 으로 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구는 집적광학의 필요성과 광자결정 학문의 발전과 더불어 현재 우수한 광학 특성으로 응용 가능성이 새

로이 제안되어 연구가 시작되고 있는 광자준결정의 일반적 PBGs 특징을 고찰한다는 점에서 주목 받을 만 하다고 할 수 있다. 우수한 광학 특성으로 특징지어지는 광자준결정이 구체적으로 어떠한 우수성을 가지는지에 대한 결론을 제시한다는 점에서 향후 광자준결정 연구에서 기초가 되는 연구 결과로 사용되는 큰 파급 효과가 있으리라 예상된다.

이에 본 논문에서는 패턴의 반지름과 굴절을 차이를 각각 독립적으로 변화하면서 투과 특성을 계산하여 Gap Map을 그려봄으로써 독립인자에 따른 각 샘플구조에서의 TE, TM 및 완전(complete or omnidirectional)-PBGs 특성을 평가하여 보았다.

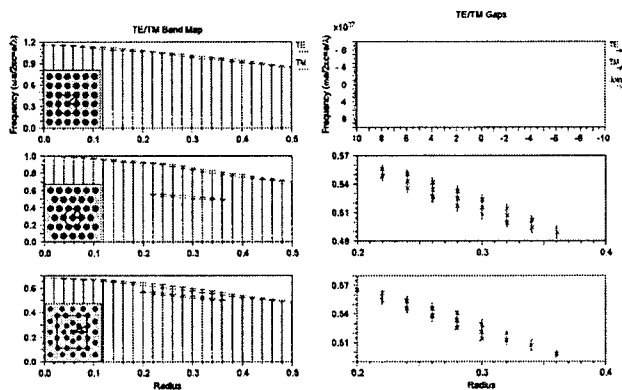


그림 2. 패턴 반지름의 변화에 따른 PBGs 변화

그림 2는 굴절을 차이는 0.45로 고정시키고 패턴 반지름을 0에서 0.5로 변화시키면서 계산한 투과 Band map과 Gap map 데이터이다. 그림 2에서 살펴볼 수 있듯이 cubic PCs에서는 굴절률 차이가 0.45 일 때는 어떤 패턴의 반지름에서도 PBGs가 생성되지 않았으나 hexagonal PCs와 8-fold PQC에서는 굴절률 차이가 0.45 일 때 유사한 패턴 반지름 영역에서 PBGs가 생성되는 것을 알 수 있다.

그림 3은 패턴 반지름을 0.29로 고정시키고 굴절을 차이를 0에서 3까지 변화시키면서 계산한 투과 Band map과 Gap map 데이터이다. 그림의 Gap map 데이터에서 파란영역은 TE PBGs이고 붉은영역은 TM PBGs, 연두영역은 TE 모드와 TM 모드 PBGs를 갖는 Omni-PBGs 영역이다.

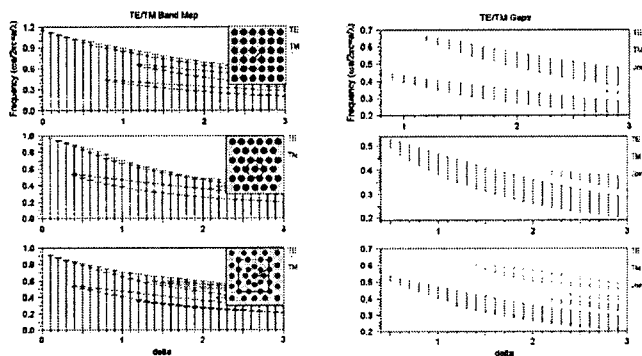


그림 3. 굴절률 차이에 따른 PBGs 변화

이 데이터에서 확인할 수 있듯이 cubic PCs에서는 TE-PBG와 TM-PBG가 생성되었지만 Omni-PBGs는 생성되지 않았고, hexagonal PCs과 8-fold PQC에서는 각각 굴절을 차이가 2.8과 1.4 인 영역에서부터 Omni-PBGs가 생성되는 것을 확인할 수 있었다. 특히 8-fold PQC의 경우 보다 넓은 frequency 영역에서 Omni-PBGs가 생성됨을 확인할 수 있었다. 이를 이용하여 낮은 굴절률 차이의 광학 재료로써 Omni-PBGs를 갖는 광학 소자의 제작이 가능하리라 생각된다. 또한, 구조적 차이로 인하여 선결함 및 점결함의 조합 가능성이 높아질 수 있으므로 결함 구조의 설계에 따라 다양한 특성으로의 응용이 이루어 질 것으로 예상된다.

4. 결론

본 논문에서는 FDTD 시뮬레이션 방법을 이용하여 2D PQC 구조의 전파특성을 이론적으로 계산하여 PBGs 특성을 논의하는 연구를 진행하였다. 본 연구의 결과 PQC 구조체는 PC 구조체보다 낮은 유전률 차이를 갖는 재료를 이용하여 넓은 영역의 Omni-PBGs 형성이 가능함을 확인하였다. 그리고 본 연구진이 보유한 홀로-리소그래피 기술을 이용하여 설계한 2D PQC 구조를 제작하는 공정을 진행중에 있다. 이러한 2D PQC를 이용하여 Omni-PBGs를 이용한 광학소자의 응용범위가 확대되리라 생각된다.

참고 문헌

- [1] 여종빈, 윤상돈, 이현용, “광자결정 제작을 위한 홀로 그래피 공정 연구”, J. KIEEME, 20(8), 726-730
- [2] Jong-Bin Yeo, Sang-Don Yun, and Hyun-Yong Lee, J. Appl. Phys. 102, 084502
- [3] Y. S. Chan, C. T. Chan, and Z. Y. Liu, Phys. Rev. Lett. 80, 956