

## 평탄한 도너와 억셉터 밴드를 갖는 주기적인 빈자리 결함이 있는 2차원 광결정

### Nearly Flat Donor and Acceptor Bands of Two-Dimensional Photonic Crystals with Periodic Vacancy Defects

조민수, 문경식, 이선구, 한연호, 정은아, 한해욱

포항공과대학교 전자전기공학과

mandark@postech.ac.kr

초기 광결정에 대한 연구는 광밴드갭이 존재하는 2차원, 3차원 광결정 구조를 찾는 것에 초점이 맞추어졌으나 최근에는 결함(defect)이 있는 구조에 대한 연구로 그 연구 분야가 넓어지고 있다. 광결정 내에 존재하는 광자의 특성은 반도체 내에 존재하는 전자의 특성과 유사하며, 진성 반도체에 도핑을 통하여 전자소자를 제작하듯이 광결정에서도 결함을 유도하여 광소자를 제작할 수 있다.

광결정에 결함을 유도함으로써 밴드갭 안에 생성되는 모드는 고립된 유한 다중도를 갖는 고유값들을 가지며, 모드 주파수는 결함의 특성에 강하게 영향을 받는다. 따라서 광결정에서 결함은 밴드갭 안에 불순물(impurity) 모드를 유도하며, 그 모드는 결함의 크기와 유전율에 의해 결정된다. 결함이 있는 광결정을 이용한 소자로는 도파로, 높은 Q 레이저, 낮은 문턱전류 레이저, 광스위치, 광트랜지스터 등이 있다. 비록 많은 형태의 결함이 연구되어 왔지만 대부분은 하나의 결함이나 결함 뭉치(cluster)가 있는 경우에 대한 결과이며, 2차원으로 주기적인 결함을 가진 경우에 대한 연구 결과<sup>(1,2)</sup>는 겨우 수 편에 불과하다.

본 논문에서는 주기적인 빈자리 결함이 있는 2차원 삼각 격자 광결정 내에 불순물 모드를 평면파 전개법(plane wave expansion method)과 시간영역 유한차분법(finite difference time domain; FDTD)을 이용하여 계산하였다. 주기적인 도너형 빈자리(vacancy) 결함과 억셉터형 빈자리 결함 모두를 고려해 계산해보면, 광결정의 광밴드갭 안에 방향에 상관없이 평탄한 불순물 밴드가 생성되는 것을 확인하였다. 주기적인 빈자리 결함을 갖는 2차원 삼각 격자 광결정은 그림 1과 같고, 이 그림 1에서  $a$ 는 광결정의 격자 상수이고,  $d$ 는 결함의 주기이다. 그림 1(a)는 유전체 물질을 공기 원자 자리에 채워 단위 셀에서 공기 원자를 제거하여 빈자리 결함을 생성한 것이다. 이 때 유전체 물질은 광결정의 바탕 물질과 같은 유전율을 갖는다. 반면 그림 1(b)는 단위 셀에서 유전체 기둥을 제거하여 역시 빈자리 결함을 생성한 것이다. 상대적인 도핑 밀도는  $f = (a/d)^2$ 이다. 단위 셀에 유전체 물질을 추가하여 생성된 결함은 반도체에서 도너 원자와 같은 특성으로 전도대 아래에 도너 모드를 생성한다. 반면 유전체 물질을 단위 셀에서 제거하여 생성된 결함은 억셉터 원자와 같은 특성으로 가전자대 바로 위에 억셉터 모드를 생성한다. 따라서 그림 1(a)의 빈자리 결함은 도너 결함이고 그림 1(b)의 빈자리 결함은 억셉터 결함이다.

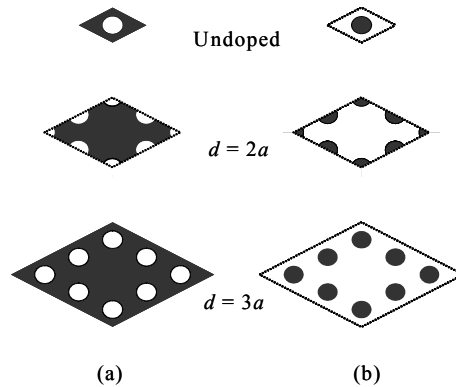


그림 1. 주기적인 빈자리 결함을 갖는 2차원 삼각 격자 광결정: (a) 도너 결함, (b) 억셉터 결함

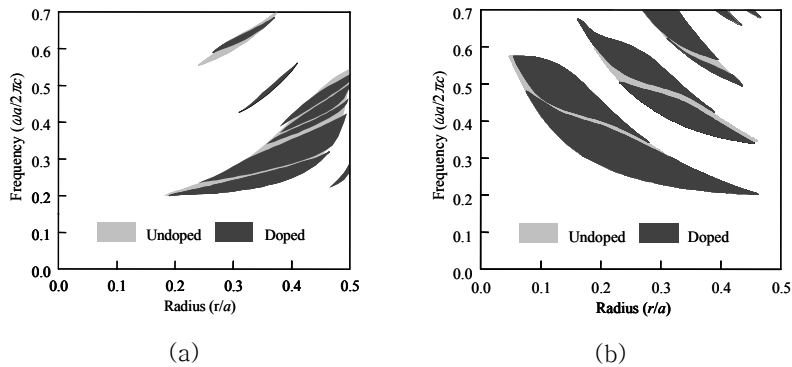


그림 2. 2차원 삼각 격자 광결정의 밴드갭: (a)주기적인 도너 결함, (b) 주기적인 억셉터 결함

주기적인 도너 결함이 있는 삼각 격자 광결정의 TE 편광에 대한 광밴드갭과 주기적인 억셉터 결함이 있는 삼각 격자 광결정의 TM 편광에 대한 광밴드갭은 그림 2와 같다. 유전체 물질의 유전율을 11.4로 결함의 주기는  $d=3a$ 로 계산하였다. 그림 2에서 보는 바와 같이 도핑이 없는 광결정의 광밴드갭과 비교해보면 주기적인 도너 결함이 있는 구조는 평탄하고 얇은 밴드들을 갖는다. 그러나 억셉터 결함이 있는 경우 도너 결함이 있는 경우와 달리 각 밴드갭에 오직 하나의 억셉터 밴드를 갖는다. 이 결과는 도너 결함은 다중의 속박상태(bound state)를 가지고 있지만 억셉터 결함은 하나의 속박상태를 갖는 것으로 설명할 수 있다. 또한, 결함의 주기가 증가하면 도핑 밀도는 감소하게 되고 불순물 밴드는 얇아지게 된다.

본 논문에서는 각각 주기적인 도너 결함과 주기적인 억셉터 결함을 갖는 2차원 삼각 격자 광결정의 광밴드 구조를 계산하였고, 이를 통하여 불순물 밴드가 광밴드갭 안에 거의 평탄하고 매우 얇은 형태로 생성된다는 것을 확인하였다. 그리고 결함의 크기와 주기를 가지고 불순물 밴드의 선폭을 조정할 수 있다. 이러한 주기적인 결함을 갖는 구조를 이용하여 얇은 대역통과 필터, 대역차단 필터로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

1. Y. W. Li, J. Y. Pan, J. Zeng, J. W. Dong and H. Z. Wang, "Band engineering and periodic defects doping by lattices compounding", Opt. Express, 13, 8526–8531 (2005).
2. K. Moon, S. Lee and H. Han, "Nearly flat impurity bands of photonic crystals with periodic vacancy defects," J. Korean Phys. Soc., 50, 532–536 (2006).