

광자 크리스탈로 구성된 광 분배기의 특성 연구

윤지수 · 정교방*

홍익대학교 전자파통신공학과

Ⓣ 121-791 서울특별시 마포구 상수동 72-1

(2001년 8월 21일 받음, 2001년 11월 30일 수정본 받음)

본 논문에서는 광자 크리스탈로 구성된 1×4 광 분배기를 설계하여 특성을 Finite-Difference Time-Domain 방법을 사용하여 고찰하였다. Simulation한 결과 bend에서의 4가지 광자 크리스탈 배열 구조와 입사파의 주파수에 따라 투과 특성이 변하는 것을 관찰하였다. 투과 특성이 가장 좋은 bend 구조로 1×4 광 분배기를 설계하고 특정 주파수를 입사시킨 결과, 입사파의 파워가 4개로 균등히 나누어짐과 전체 전송 효율이 약 93%임을 관찰하였다.

주제어 : diffraction, integrated optics/waveguide, unclassified.

I. 서 론

광자 크리스탈(Photonic Crystals) 이란 유전체가 적당한 유전율을 가지며 주기적으로 배열된 구조를 말한다.¹⁾ 원자나 분자의 주기적인 배열 구조인 크리스탈(Crystal)에서는 전자에 대해 에너지 밴드가 존재하는 특성을 보이고, 특히 반도체에서는 valence band와 conduction band 사이에 완벽한 에너지 밴드갭이 존재한다. 이와 유사하게 광자 크리스탈에 전자파가 입사되면 특정 주파수 범위에서 전자파가 통과하지 못하는 차단 영역이 발생하는데, 이를 광자 밴드갭(Photonic Band Gap, PBG)이라 한다. 광자 밴드갭을 가지는 광자 크리스탈에 디렉트가 존재하면 디렉트 모드^{2,3)}가 광자 밴드갭 내부에 존재하며, 디렉트가 직렬로 구성되면 전자파는 디렉트를 따라서 진행하게 되므로 광자 크리스탈 도파로⁴⁾가 형성된다. 직렬 디렉트로 구성된 광자 크리스탈 도파로에서는 밴드갭 내부에 존재하는 모드만이 도파로를 따라 진행하므로, 굴절을 차이를 이용한 일반적인 광 도파로에서 발생하는 매질의 흡수에 의한 손실을 줄이면서 심하게 꺾이는 bend에서도 높은 전송 효율로 전자파를 전송할 수 있다. 이와 같이 전자파를 효율적으로 도파 및 제어할 수 있다는 점에서 최근 들어 광자 크리스탈 도파로 분야⁴⁻⁷⁾에 대한 관심이 커지고 있다. 이 외에도 광자 크리스탈을 응용한 유전체 반사 거울, 공진 캐비티, 레이저, 필터, 광섬유 분야의 연구가 진행 중이며, 광 파장 영역 뿐만 아니라 마이크로파 영역에서의 응용도 나오고 있다.

본 논문에서는 시간 영역의 해석 방법인 Finite-Difference Time-Domain(FDTD) 방법을 사용하여 광자 크리스탈의 특성인 광자 밴드갭의 존재를 확인하고, 직렬 디렉트로 이루어진 광자 크리스탈 광 도파로를 구성하여 입사파가 설계한 도파로를 따라서 손실 없이 진행함을 확인하였다. 다음에 광 도파로로 구성된 몇 가지 구조의 1×2 광 분배기를 구성하여 각각

의 특성을 분석한 후, 1×4 광 분배기를 설계하고 분배된 입사파의 전송 효율과 파워의 분배를 계산하였다.

II. 해석 방법

Yee에 의해 처음 소개되고 본 논문에서 사용된 FDTD 방법⁸⁾에서는 편 미분 방정식인 맥스웰 방정식을 시간 및 공간 영역에서 차분 방정식으로 바꿔 계산한다. 그림 1은 Yee 알고리즘을 구현하기 위한 3차원 단위 격자를 보여주고 있다. 본 연구에서 사용되는 2차원 문제에 대해 맥스웰 방정식을 차분 방정식으로 바꿨을 때의 2차원 TM 모드(z 방향으로 무한 길이, 전계가 z 방향으로 TE 모드(z 방향으로 무한 길이, 자계가 z 방향)에 대한 기본식이 아래의 (1)식과 (2)식에 각각 표시되어 있다.

$$\begin{aligned}
 H_x^{n+1/2} &= H_x^{n-1/2} - \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta x} (E_z^{n, i+1/2, j} - E_z^{n, i-1/2, j}) \\
 H_y^{n+1/2} &= H_y^{n-1/2} + \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta y} (E_z^{n, i+1/2, j} - E_z^{n, i-1/2, j}) \\
 E_z^{n+1, i, j} &= E_z^{n, i, j} + \frac{\Delta t}{\epsilon_0 \Delta y} (H_y^{n+1/2, i+1/2, j} - H_y^{n+1/2, i-1/2, j}) \\
 &\quad - \frac{\Delta t}{\epsilon_0 \Delta x} (H_x^{n+1/2, i+1/2, j} - H_x^{n+1/2, i-1/2, j}) \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_x^{n+1, i, j} &= E_x^{n, i, j} + \frac{\Delta t}{\epsilon_0 \Delta x} (H_z^{n+1/2, i+1/2, j} - H_z^{n+1/2, i-1/2, j}) \\
 E_y^{n+1, i, j} &= E_y^{n, i, j} - \frac{\Delta t}{\epsilon_0 \Delta y} (H_z^{n+1/2, i+1/2, j} - H_z^{n+1/2, i-1/2, j}) \\
 H_z^{n+1/2, i, j} &= H_z^{n-1/2, i, j} + \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta x} (E_y^{n, i+1/2, j} - E_y^{n, i-1/2, j}) \\
 &\quad - \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta y} (E_x^{n, i+1/2, j} - E_x^{n, i-1/2, j}) \quad (2)
 \end{aligned}$$

*E-mail: kbchung@wow.hongik.ac.kr

(1)식과 (2)식에서 Δx 와 Δy 는 공간 증분이고 Δt 는 시간 증분이다. 또한 i, j 는 2차원 계산 그리드에서의 셀의 x 축 방향과 y 축 방향의 위치를 각각 나타내며, n 은 time-step의 횟수를 표시하는 첨자이다(i, j, n 은 각각 정수).

계산 영역은 total-field 영역과 scattered-field 영역으로 나뉘어져 있고, total-field 영역 안에 광자 크리스탈이 존재하며 두 영역의 경계면에서 Gaussian 주파수 분포의 입사파를 주입한다(total-field/scattered-field formulation).¹⁸⁾ scattered-field 영역 외부에 산란파의 반사를 제거하기 위해서 perfectly matched layer(PML)¹⁹⁾ 흡수 경계 조건을 적용하였다. Berenger에 의해 제안된 PML은 계산 공간 외부에, 내부와의 impedance matching을 이루면서 conductivity가 점진적으로 증가하는 몇 개의 격자를 더 두어, 그 격자에 들어오는 전자파의 크기를 점차적으로 소멸시키는 방식이다. 그림 2에 전체 해석 공간과 각 영역이 표시되어 있다.

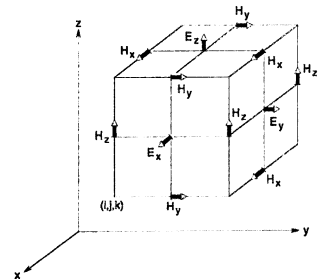


그림 1. Yee 공간 격자의 단위 셀 (참고문헌 [8]).

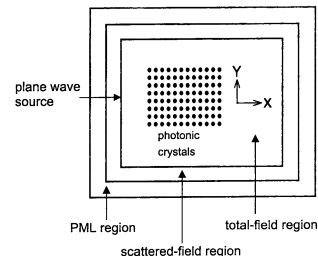


그림 2. 2차원 계산 영역 및 광자 크리스탈.

III. 광자 밴드갭

정사각형 격자 위에 유전체 원형봉이 공기 중에 배열되어 있는 구조(그림 3참조)의 TM 모드에 대한 광자 밴드갭을 확인하였다. 그림 3에서 유전체 원형봉의 반지름은 $0.18a$ (a 는 격자상수)이고 유전율은 11.56 ϵ_0 이다. Gaussian 주파수 분포의 입사파를 주입하고 광자 크리스탈에서 수 배의 격자상수만큼 떨어진 지점에 관찰점을 두어 광자 크리스탈을 투과한 전체의 시간에 대한 변화를 관찰한다.¹⁵⁾ 입사파와 투과파의 전체의 Fourier 변환을 각각 행하고 그 비를 취하여 주파수 영역의 투과 특성을 확인한 결과, 그림 4와 같이 대략 $\omega = 0.28 \times 2\pi c/a$ (c 는 공기 중의 광속도)에서 $\omega = 0.43 \times 2\pi c/a$ 까지의 광자 밴드갭을 확인하였다. 그림 4에서 구한 광자 밴드갭은 완전한 밴드갭이 아니고 특정한 전파 방향에 대한 밴드갭이다. 모든 전파 방향에 따른 완전한 밴드갭을 확인하기 위해서는 그림 5(a)의 구조에 대한 밴드 구조가 필요하다. 그림 5(a)의 원시 세포 구조에 주기적 경계 조건을 적용하여 원시 세포만의 계산 영역을 만든 후, 특정 파동벡터에 대해 주파수 영역에서 존재 가능한 모든 field를 인가한다. 다음에 적절한 time-step동안 field를 계산하여 이를 푸리에 변환을 하면 광자 크리스탈 내에서 특정 파동벡터에 해당하는 고유모드 주파수를 얻을 수 있다. 이를 각각의 파동벡터에 대해 반복 계산하면 원

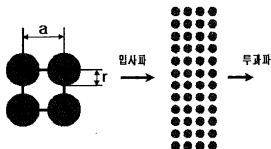


그림 3. 유전체 원형봉이 공기 중에 배열된 구조의 격자상수 (a)와 반지름 (r) 및 광자 밴드갭 해석 구조.

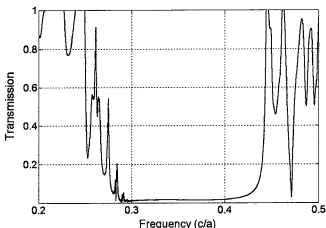


그림 4. 그림 3의 광자 크리스탈의 TM 모드에 대한 투과 계수 및 광자 밴드갭.

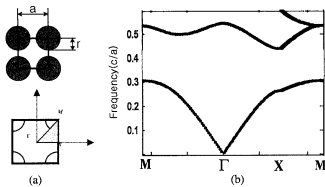


그림 5. 광자 크리스탈의 밴드 구조 계산 결과 (a) 정사각형 기둥 구조의 원시 세포와 Brillouin 영역 (b) 밴드 구조.

하는 광자 크리스탈 구조에 대한 밴드 구조를 구할 수 있다.^[10] (자세한 계산 과정은 참고 문헌[10]에 기술되어 있다) 계산 결과 그림 5(a)의 구조에서는 TE 모드에 대한 밴드갭은 존재하지 않고 TM 모드에 대해서 $\omega = 0.3 \times 2\pi c/a$ 에서 $\omega = 0.42 \times 2\pi c/a$ 까지의 완전한 밴드갭이 존재함을 그림 5(b)와 같이 확인하였다.

IV. 광 분배기

본 절에서는 광자 크리스탈 도파로로 구성된 광 분배기를 구성하고 특성을 분석하였다. 정사각형 격자 위에 유전체 원형봉이 공기 중에 배열된 구조에서 원형봉을 직렬로 제거하면 직렬 디펙트로 구성된 광자 크리스탈 도파로를 만들 수 있다. 원형봉의 반지름은 $0.18a$ 이고 유전율은 11.56이다. 투과파와 도파로 끝에서 발생하는 반사파를 분리하기 위해 $100a \times 21a$ 의 크기로 광자 크리스탈을 구성한 후, 원형봉을 직렬로 제

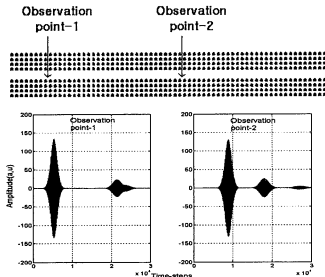


그림 6. 광자 크리스탈 도파로 내부의 관찰점에서의 시간에 따른 파형의 변화. 두 관찰점 공히 첫번째 파형이 투과파이고 두번째 파형이 도파로 우측 단에서 발생하는 반사파이다.

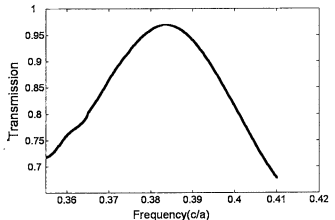
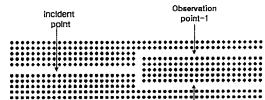


그림 7. 1×2 광 분배기의 주파수 변화에 따른 전송 효율.

거해서 도파로를 만들고 observation points에서 입사파가 도파로를 따라 진행하는지를 확인하였다(그림 6 참조).

Observation point-1과 observation point-2에서 투과파의 시간 평균 파위가 서로 일치하므로 입사파가 손실 없이 도파로를 따라 진행함을 알 수 있다. 입사파를 두개의 도파로로 분배하기 위해 $200a \times 41a$ 의 크기로 광자 크리스탈을 구성한 후, 그림 7과 같이 직렬 디펙트와 90° bend 구조로 1×2 광 분배기를 설계하였다. 입사파로는 $\omega = 0.35 \times 2\pi c/a$ 에서 $\omega = 0.41 \times 2\pi c/a$ 까지의 주파수 대역을 포함하도록, 서로 다른 중심 주파수를 가지면서 주파수 대역폭이 $\Delta\omega = 0.20 \times 2\pi c/a$ 인 5개의 Gaussian 주파수 분포의 펄스를 사용하였다. 여기서 한 개의 넓은 주파수 분포의 펄스를 사용하지 않고 5개의 펄스를 사용한 이유는 참고문헌 [4]에 기술되어 있다(참고문헌 [4]에서는 분배기가 아니라 단일 도파로만을 해석하였음). 각 입사파에 대해 분배 도파로의 두 observation points에서 투과파의 전계를 시간에 따라 저장하고, 입사파와 투과파를 각각 Fourier 변환한 후 그 비를 취하여 전송 효율을 구한다. 각 입사파에 대해 전송 효율을 구한 결과를 통합하고(참고문헌 [4]의 과정과 유사), 두 observation points에서의 값의 합을 구한 것이 그림 7에 표시되어 있다. 주파수가 $\omega = 0.383 \times 2\pi c/a$ 일 때 가장 높은 전송 효율을 보이며 주파수에 따라서 전송 효율이 변화하는 것을 알 수 있다.

다음에는 bend 근처의 원형봉의 배열을 변화시켜서 특성을 관찰하였고 그 결과가 그림 8이다. 그림 7과 같이 90° bend 구조를 갖는 도파로는 (01)방향의 도파로와 (10)방향의 도파로가 (11)방향의 짧은 도파로와 결합된 구조라고 생각할 수 있다. 도파로내에 존재하는 도파 모드의 파동 벡터를 진행 방향

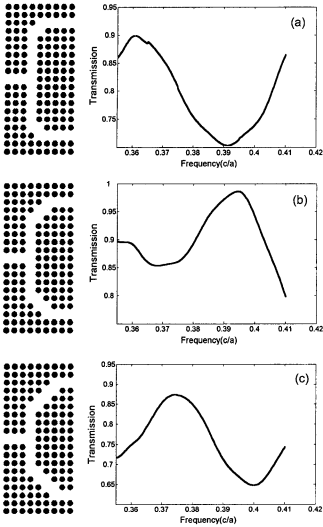


그림 8. Bend 구조와 주파수 변화에 따른 전송 효율.

에 따라 $k_1(\omega)$, $k_2(\omega)$ 로 구분할 수 있다. $k_1(\omega)$ 는 (01)이나 (10)방향의 도파모드의 파동 벡터이며, $k_2(\omega)$ 는 (11) 방향의 도파 모드의 파동 벡터이다. Bend에서의 투과 특성을 1차원 산란 구조로 생각하고 파동 벡터 k_1 의 모드가 파동 벡터 k_2 에 의해 산란되는 과정으로 간단히 한다면 bend에서의 반사 계수는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.⁴⁾

$$R(\omega) = \left[1 + \left(\frac{2k_1(\omega)k_2(\omega)}{|k_1^2(\omega) - k_2^2(\omega)| \sin(k_2(\omega)L)} \right)^2 \right]^{-1} \quad (3)$$

이 식에서 주파수와 bend의 길이 L 에 따라 투과 특성이 변화한다는 것을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 주파수와 원형봉의 배열을 변화시켜서 bend의 길이(L)가 다른 3가지 구조에 대해 1×2 광 분배기의 투과 특성을 확인하였다. 3가지 구조 중 그림 8(b)의 bend 구조에서 주파수가 $\omega = 0.395 \times 2\pi c/a$ 일 때 가장 높은 전송 효율인 98.6%를 보이며 전반적으로 다른 bend 구조보다 높은 전송 효율을 보이는 것을 알 수 있다. 따라서 그림 8(b)의 bend 구조를 갖는 1×4 광 분배기를 설계하고 그 구조를 그림 9에 표시하였다.

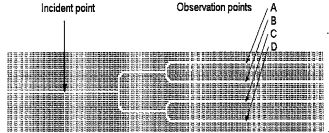


그림 9. 1×4 광 분배기와 observation points.

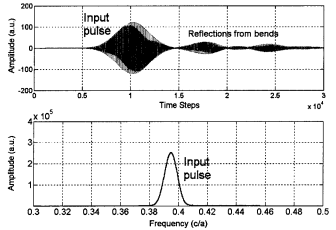


그림 10. 그림 9의 Incident point에서의 입사파와 반사파.

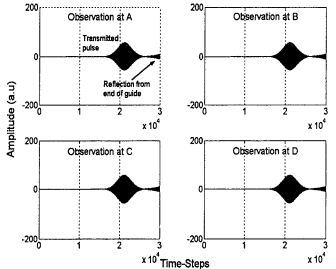


그림 11. 그림 9의 Observation points에서의 전송파와 반사파.

입사단에 중심 주파수가 $\omega = 0.395 \times 2\pi c/a$ 이고 주파수 대역 폭이 $\omega = 0.01 \times 2\pi c/a$ 인 입사파를 가했을 때, incident point에서 입사파와 bends에서의 반사파를 확인할 수 있다(그림 10 참조). 그리고 그림 11에서 각 observation points (A, B, C, D)에서의 분배된 전송파와 도파로 끝에서의 반사파를 확인할 수 있다. 입사파와 분배된 전송파의 시간 평균 파워를 비교한 결과, 4개의 observation points에서의 파워가 균등히 나누어진

표 1. 그림 9의 observation points에서의 광 파워 전송 효율

Observation Points	Power Transmission
A	0.231
B	0.233
C	0.233
D	0.233

것을 표 1과 같이 확인했으며 약 93%의 전송 효율을 보였다 (소수점 셋째 자리 이하의 차이는 수치 해석 계산상의 오차에서 기인한 것으로 판단된다).

V. 결 론

본 논문에서는 FDTD 방법을 이용하여 2차원 광자 크리스탈로 구성된 광 분배기의 특성을 분석하였다. 먼저 광자 크리스탈의 특징인 광자 밴드갭을 정사각형 기둥구조에 대해 확인하였고, 직렬 디펙트로 이루어진 광자 크리스탈 도파로를 구성하여 입사파가 도파로를 따라 손실없이 진행함을 확인하였다. 다음에 광자 크리스탈 도파로로 구성된 광 분배기를 설계하여 전송 효율이 bend에서의 광자 크리스탈 배열 구조와 입사파의 주파수에 따라 변화함을 관찰하였다. 분석한 몇 개의 배열 구조 중 가장 높은 효율을 보이는 bend 구조로 1×4 광 분배기를 설계하여, 중심 주파수가 $\omega = 0.395 \times 2\pi c/a$ 인 입사파를 가해준 결과, 입사파의 파워가 4개로 균등히 나누어짐과 전체 전송 효율이 약 93%임을 관찰하였다. 따라서 이와 같은 결과로 부터 광자 크리스탈 광 분배기의 가능성을 확인하였고, 향후 광자 크리스탈 구조를 변화시키거나 디펙트를 추가하여 전송 효율을 높일 예정이다.

감사의 글

본 연구는 차세대 포토닉스사업단과 차세대 광-무선기갑자랑

연구센터 및 교육부 BK21 핵심사업에 의해 지원되었습니다.

참고문헌

- [1] J. D. Joannopolous, R. D. Meade, and J. N. Winn, *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light* (Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1995).
- [2] J. O. Vasseur, B. Djafari-Rouhani, L. Dobrzynski, and A. Akjouj, "Defect modes in one-dimensional comblike photonic waveguides," *Phys. Rev. B*, vol. 59, no. 20, pp. 446-452, 1999.
- [3] 서영술, 정교방, "2차원 광자 밴드갭 구조의 디펙트 모드 특성," 한국광학회지, 제 11권 3호, pp. 198-201, 2000.
- [4] A. Mekis, J. C. Chen, I. Kurland, S. Fan, P. R. Villeneuve, and J. D. Joannopoulos, "High transmission through sharp bends in photonic crystal waveguides," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 77, no. 18, pp. 3787-3790, 1996.
- [5] S. Fan, S. G. Johnson, and J. D. Joannopoulos, "Waveguide branches in photonic crystals," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 18, no. 2, pp. 162-165, 2001.
- [6] A. Mekis and J. D. Joannopoulos, "Tapered couplers for efficient interfacing between dielectric and photonic crystal waveguides," *J. Lightwave Technol.*, vol. 19, no. 6, pp. 861-865, 2001.
- [7] 윤지수, 정교방, 제8회 광전자 및 광통신공학 학술회의, 대한전기학회, 한국광학회, 한국통신학회, 대한전자공학회, 무주, 2001, p. 337.
- [8] A. Taflove and S. C. Hagness, *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*, Second Edition, (Artech House, Boston, 2000).
- [9] J. P. Berenger, "A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves," *J. Comput. Phys.*, vol. 114, pp. 185-200, 1994.
- [10] 홍수완, 김창모, 정교방, "FDTD 방법을 이용한 광자 크리스탈의 밴드 구조와 분산 곡선 계산," 제8회 광전자 및 광통신 학술회의, FC2-25, 339-340, 2000.

Analysis of optical splitters in photonic crystals

Ji-Soo Yoon and Kyo-Bang Chung[†]

Department of Radio and Communication Engineering, Hong Ik University, Seoul 122-791, KOREA

[†]E-mail: kbchung@wow.hongik.ac.kr

(Received August 21, 2001 ; revised manuscript received November 30, 2001)

We design a 1×4 optical splitter made of photonic crystal waveguides and analyze the properties of the optical splitter using the finite-difference time-domain method with perfectly-matched-layer absorbing boundaries. The photonic crystal is constructed from cylindrical rods in air on a square lattice. Our simulation results show that there are different transmission properties for four bend geometries and different incident-wave frequencies. The sum of the power transmission of the splitted light is over 93 percent at a certain geometry and frequency, and the incident power splits in the four arms with almost the same ratio.

Classification codes : DL010, OE010, UC010.