

# 공기 및 실리카 클래딩을 갖는 2차원 실리콘 광자 결정 슬랩 구조의 광학적 특성

이윤식<sup>1</sup> · 한진규<sup>2</sup> · 송봉식<sup>1,2†</sup>

<sup>1</sup>성균관대학교 정보통신공학부

<sup>2</sup>성균관대학교 나노과학기술원

Ⓢ 440-746 경기도 수원시 장안구 천천동 300

(2009년 4월 23일 받음, 2009년 7월 28일 수정본 받음, 2009년 7월 28일 게재 확정)

초소형 광집적 회로를 실현하기 위해 실리콘 기반의 2차원 광자 결정에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그 중에서 대표적 구조인 공기 클래딩을 갖는 2차원 실리콘 광자 결정은 우수한 광학적 특성을 가지나, 다양한 소자를 집적화하기에는 기계적 강도가 약하다. 본 연구에서는 기계적 강도를 향상시킨 대칭적인 저굴절률 실리카 클래딩을 갖는 2차원 실리콘 광자 결정을 제안하며, 공기 및 실리카 클래딩을 갖는 광자 결정 슬랩 구조의 광학적 특성을 이론적으로 비교하였다. 3차원 유한 차분 시간 영역법을 이용하여 공기 클래딩을 갖는 2차원 실리콘 광자 결정 슬랩 구조를 분석한 결과, 광통신 대역에서 약 330 nm의 광자 밴드갭과 약 100 nm의 무손실 도파 대역을 가짐을 보였다. 이러한 결과를 바탕으로 실리카 클래딩을 갖는 2차원 광자 결정 슬랩 구조를 계산한 결과, 클래딩의 굴절률이 공기보다 높음에도 불구하고 공기 클래딩 구조의 광학적 특성에 버금가는 약 230 nm의 광자 밴드갭과 약 90 nm의 무손실 도파 대역을 갖는 구조를 설계하였다.

## Optical Characteristics of Two-dimensional Silicon Photonic Crystal Slab Structures with Air and Silica Cladding

Yoon-Sik Lee<sup>1</sup>, Jin-Kyu Han<sup>2</sup>, and Bong-Shik Song<sup>1,2†</sup>

<sup>1</sup>School of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, Jangan-gu, Suwon 440-746, Korea

<sup>2</sup>Sungkyunkwan University Advanced Institute of Nano Technology, Sungkyunkwan University, Jangan-gu, Suwon 440-746, Korea

†E-mail: songwiz@skku.edu

(Received April 23, 2009; Revised manuscript July 28, 2009; Accepted July 28, 2009)

Much research into two-dimensional (2-D) photonic crystal (PC) structures has been conducted for realization of ultrasmall optical integrated circuits. A 2-D silicon (Si) PC slab structure with air cladding ( $n=1$ ) is one of the representative structures in 2-D PCs. While air-clad Si PC slab structures have good optical characteristics, their suspension in air can lead to mechanical weakness, making integration with some optical devices difficult. In this paper, we propose improving the mechanical robustness of PC structure by developing a 2-D Si PC structure with symmetric silica cladding ( $n=1.44$ ) and comparing its optical properties to that of the air-clad structure. First, we investigate the optical properties of a 2-D Si PC slab structure with air cladding by using a 3-D finite difference time domain method. We determined that a photonic bandgap of 330 nm and a non-leaky propagating bandwidth of 100 nm in the optical communication range are possible. Next, we investigate the optical properties of 2-D Si PC slab structures with silica cladding. Even though the refractive index of the silica cladding is higher than that of air, we developed a silica-clad structure with good optical properties: a photonic band gap of approximately 230 nm and a non-leaky propagating bandwidth of 90 nm, comparable to that of the air-clad PC structures.

Keywords: Photonic crystal, Photonic band gap, Waveguide, Air, Silica

OCIS codes: (130.3120) Integrated optics devices, (230.7400) Waveguides, slab, (230.3990) Microstructure devices

### I. 서 론

광자 결정(photonic crystal)은 빛의 파장 정도의 주기적인

†E-mail: songwiz@skku.edu

굴절률 분포를 가진 구조체로, 전자 밴드갭(electronic band gap)과 유사하게 특정한 주파수 영역에서 빛이 존재하지 않는 광자 밴드갭(photonic band gap) 특성을 가지고 있다. 또한, 광자 밴드갭 내에 선결함(line defect) 또는 점결함(point

defect) 모드를 도입하면 각각 미세 도파로와 나노 공진기로서 작용한다. 이러한 광자 결정 소자를 집적화한 초소형 광 필터, 센서, 초소형 레이저 등에 관한 다양한 연구가 활발히 이루어지고 있다.<sup>[1,2]</sup>

광자 결정 중에서 2차원 주기적 구조에 의한 광자 밴드갭 효과와 상하 방향의 굴절률 차이에 의해 광자를 제어할 수 있는 2차원 광자 결정 슬랩 구조에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>[3]</sup> 특히, 슬랩이 실리콘이며, 주변이 공기로 둘러싸인 구조(공기 클래딩)를 갖는 2차원 실리콘 광자 결정 슬랩은 공기와 실리콘의 큰 굴절률 차이( $n_{Si}=3.4$ ,  $n_{air}=1$ ) 때문에 상하 방향의 광기둥(optical confinement) 효과가 커서 넓은 광자 밴드갭이 형성된다. 또한, 공기 클래딩을 갖는 2차원 실리콘 광자 결정을 이용하여 광통신 파장 대역에서 광대역(~100 nm) 도파 영역을 갖는 미세 도파로가 구현되었다. 공기 클래딩을 갖는 2차원 실리콘 광자 결정 구조는 우수한 광학적 특성을 갖고 있지만, 기계적 강도가 약하여 외부 도파로나 감지기 등을 집적화하기 어려운 단점이 있다. 이를 보완하기 위해 실리콘 슬랩 하부에 저굴절률의 실리카 층이 존재하는 SOI(Silicon-On-Insulator) 구조에 대한 연구가 대두되었으나, SOI 구조에서는 비대칭 구조(공기/실리콘 광자 결정/실리카)에 의한 TE-TM 모드의 커플링 손실이 발생하기 때문에 대칭 구조인 공기 클래딩 구조에 비해 광학적 특성이 현저히 악화된다.<sup>[4-7]</sup> 또한, 최근에 TE-TM 모드 커플링 손실을 회피하기 위하여 대칭적인 실리카 클래딩을 갖는 광자 결정 구조의 연구가 시도되었으나, 도파로의 무손실 도파 대역이 약 10 nm에 불과하다.<sup>[8]</sup>

따라서, 본 논문에서는 기계적 강도의 강화와 TE-TM 모드 커플링 손실을 회피하기 위하여 구멍 내부까지 실리카로 충전된 대칭적인 실리카 클래딩을 갖는 2차원 실리콘 광자 결정 슬랩 구조(실리카/실리콘 광자 결정/실리카)를 이론적으로 해석하였다. 이를 위해 3차원 유한 차분 시간 영역법(FDTD 법:finite difference time-domain method)<sup>[9]</sup>을 이용하여 공기 클래딩을 갖는 2차원 실리콘 광자 결정 구조에서 다양한 기하학적 변수(구멍 크기, 슬랩 두께, 도파로 폭)에 따른 광자 밴드갭과 도파로의 특성을 고찰하였으며, 이를 바탕으로 공기 클래딩 구조의 우수한 광학적 특성에 버금가는 실리카 클래딩을 갖는 2차원 실리콘 광자 결정 슬랩 및 도파로 구조를 설계하였다.

## II. 공기 클래딩을 갖는 2차원 실리콘 광자 결정 슬랩 및 도파로

그림 1(a)는 실리콘 슬랩( $n=3.4$ )이 삼각형 격자 구조의 공기 구멍을 갖고, 그 주변은 공기( $n=1$ ) 클래딩을 갖는 2차원 실리콘 광자 결정 슬랩의 모식도를 나타낸다. 그림 1(b)는 공기 구멍의 반지름  $r=0.29a$ , 슬랩의 두께  $t=0.6a$ 일 때( $a$ 는 격자상수) TE 모드에 대한 밴드 다이어그램을 계산한 결과를 나타낸다. 이러한 분산 관계는 슬랩 방향의 주기적인 Bloch 경계 조건과 상하 방향의 Mur 흡수 경계 조건을 적용하여

계산되었다.<sup>[10,11]</sup> 그림에서 회색칠 부분은 슬랩 내의 모드가 슬랩 외부의 공기 클래딩으로 커플링되는 손실 영역인 light cone이며, 그 경계선은 light line이다. 그림 1(b)에서 알 수 있듯이,  $0.256\sim 0.32 [c/a]$ ( $c$ 는 진공 중 광속) 주파수 영역에서 광자 밴드갭이 존재한다.  $a=420$  nm일 때 광자 밴드갭을 파장으로 환산하면 약 1310~1640 nm에 해당하며 광통신 영역에서 약 330 nm의 광자 밴드갭이 존재함을 알 수 있다.

이러한 광자 밴드갭은 광자 결정 슬랩의 기하학적 구조에 영향을 받으므로 그림 1(a)의  $r$ 과  $t$ 의 변화에 따른 밴드 다이어그램을 계산하였다. 그림 2(a)는  $t=0.6a$ 일 때  $r$ 의 변화에 따른 밴드 다이어그램이며, 그림 2(b)는  $r=0.29a$ 일 때  $t$ 의 변화에 따른 밴드 다이어그램이다. 그림 2에서 알 수 있듯이  $r$ 이 작아질수록 밴드갭의 주파수가 낮아지고 광자 밴드갭이 약간 줄어드는 경향이 있다. 또한,  $t$ 가 두꺼워질수록 광자 밴드갭이 전체적으로 저주파수로 이동한다. 이러한 결과는  $r$ 이 작아지거나  $t$ 가 두꺼워짐에 따라 실리콘 슬랩의 유효 굴절률이 높아지기 때문이다.

그림 1(a)와 같은 2차원 실리콘 광자 결정 슬랩 구조에 적절한 선형 결함을 도입하면, 밴드갭 내에 도파 모드가 존재하는 미세 도파로가 된다. 그림 3(a)는 공기 클래딩을 갖는 2차원 실리콘 광자 결정 슬랩에 한 열의 공기 구멍이 제거된 선형 결함을 도입한 도파로( $W_d=\sqrt{3}a=W1$ )의 모식도이다. 그림 3(b)는  $r=0.29a$ ,  $t=0.6a$ ,  $W1$ 을 갖는 2차원 실리콘 광자

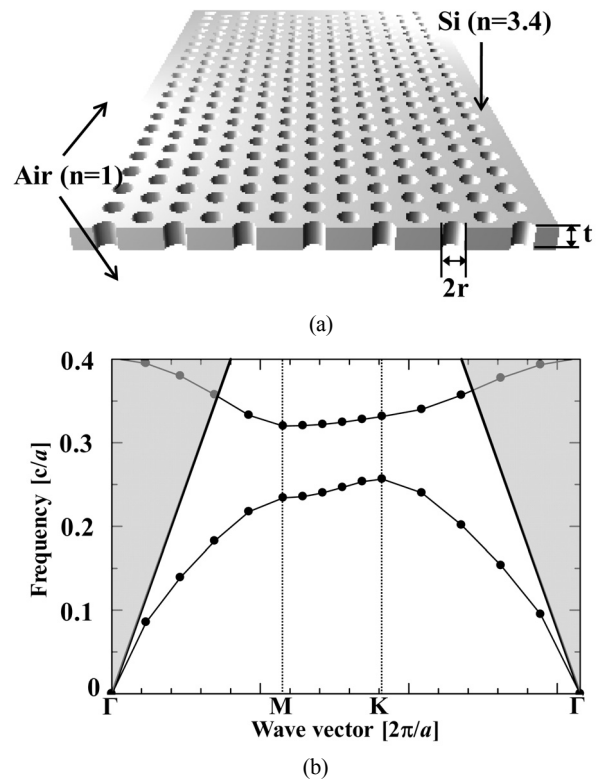


Fig. 1. (a) Schematic and (b) photonic band diagram of a two-dimensional (2-D) silicon (Si) photonic crystal (PC) slab with air cladding ( $r=0.29a$ ,  $t=0.6a$ ).

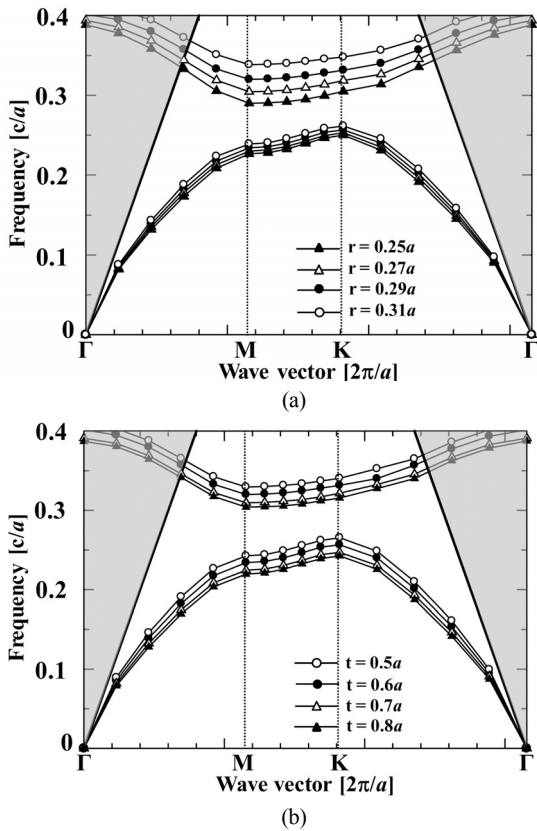


Fig. 2. Photonic band diagrams versus various (a) hole radius ( $t=0.6a$ ) and (b) slab thickness ( $r=0.29a$ ) in a 2-D Si PC slab with air cladding.

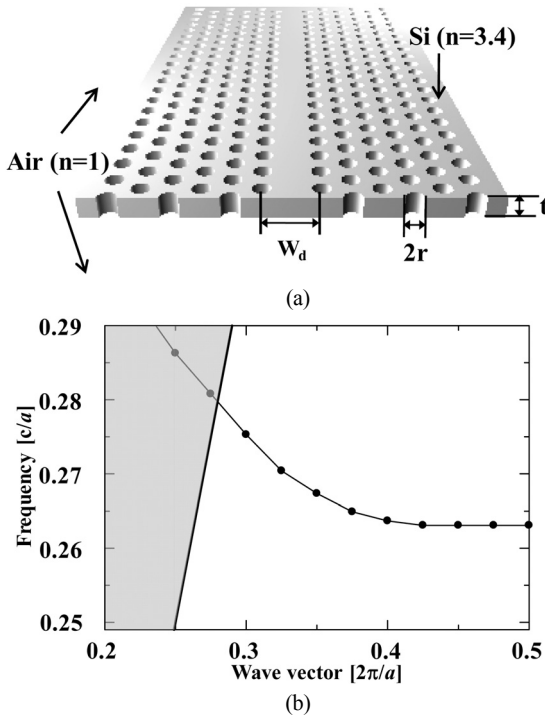


Fig. 3. (a) Schematic and (b) photonic band diagram of a 2-D Si PC slab waveguide with air cladding ( $W_d=\sqrt{3}a=W_1$ ,  $r=0.29a$ ,  $t=0.6a$ ).

결정 도파로의 분산 관계를 나타낸 것으로 공기 light line보다 낮은 무손실 도파 주파수 대역은  $0.263\sim 0.279 [c/a]$ 에 존재한다. 이 주파수 대역은 약  $1500\sim 1600 \text{ nm}$  파장 대역에 해당하며, 광통신 파장 영역인  $1550 \text{ nm}$ 를 충분히 포함하고 있다.

이러한 공기 클래딩을 갖는 2차원 실리콘 광자 결정 도파로의 모드 변화 양상을 살펴보기 위하여 구조적 파라미터( $r, t, W_d$ )에 따른 분산 관계를 계산하였다. 그림 4(a)는 공기 클래딩을 갖는 2차원 실리콘 광자 결정 도파로에서  $t=0.6a$ 일 때,  $r$ 의 변화에 따른 도파 모드를 나타낸 것이며, 그림 4(b)는  $r=0.29a$ 일 때  $t$ 의 변화에 따른 무손실 도파 모드를 계산한 결과이다. 그림 4에서  $r$ 이 작아지거나  $t$ 가 두꺼워지면 무손실 도파 대역이 다소 증가한다. 이는 유효 굴절률의 변화로 인해 도파 모드의 주파수가 낮아져서 공기 light line의 영향이 적어지기 때문이다.

그림 5는 공기 클래딩을 갖는 2차원 실리콘 광자 결정 도파로의  $W_d$  변화에 따른 도파 모드를 계산한 결과이다.  $W_d$ 가 넓은  $1.25W_1$ 의 경우에는 무손실 도파 대역이 다소 증가하는 반면,  $W_d$ 가 좁은  $0.875W_1$ 의 경우에는 무손실 도파 대역이 감소한다. 이는  $W_d$ 가 넓어질수록 도파로의 유효 굴절률이 증가하여 도파 모드의 주파수가 저주파 대역으로 이동하기 때문이다. 이와 같이 도파 모드의 주파수가 낮아지면 light line의 영향이 줄어들어 무손실 도파 대역이 증가한다. 그러

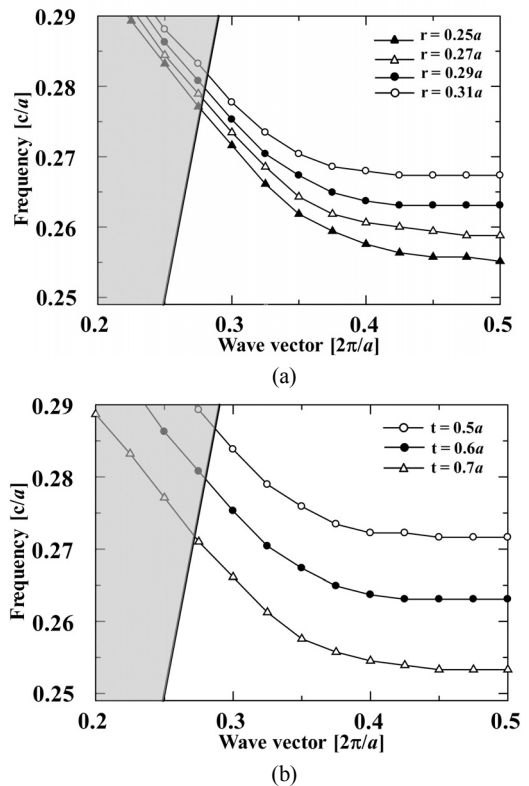


Fig. 4. Photonic band diagrams versus various (a) hole radius ( $t=0.6a, W_d=W_1$ ) and (b) thickness ( $r=0.29a$ ) in a 2-D Si PC slab waveguide with air cladding.

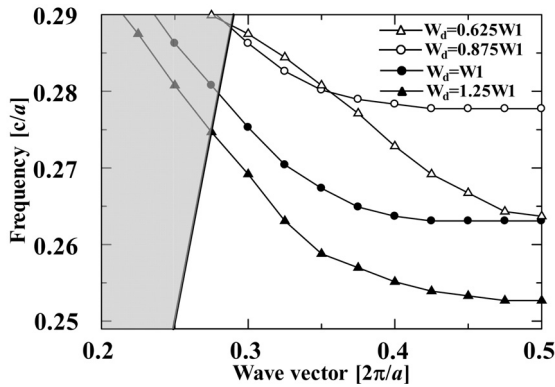


Fig. 5. Photonic band diagram versus various waveguide width in a 2-D Si PC slab waveguide with air cladding ( $r=0.29a$ ,  $t=0.6a$ ).

나  $W_d=0.625W1$  일 경우에는 광자 밴드갭의 저주파수 영역에 해당하는 슬랩 내 도파 모드가 광자 밴드갭 내에서 군속도가 큰 새로운 도파 모드로 형성되어 그림 5에서와 같이 넓은 무손실 도파 대역을 갖게 된다.<sup>[6,7]</sup>

### III. 실리카 클래딩을 갖는 2차원 실리콘 광자 결정 슬랩 및 도파로

앞 절에서 살펴본 바와 같이, 공기 클래딩을 갖는 2차원 실리콘 광자 결정은 넓은 광자 밴드갭과 무손실 도파 대역을 갖는 등 광학적 특성이 우수하다. 그러나 공기 클래딩 구조는 다양한 소자를 집적화 시키는 데 있어서 기계적 강도가 취약한 단점이 있다. 본 절에서는 2차원 실리콘 광자 결정의 기계적 강도를 증가시키는 동시에 우수한 광학적 특성도 유지하기 위해 대칭적인 저굴절률 실리카 클래딩을 갖는 2차원 실리콘 광자 결정에 대한 연구 결과를 살펴보았다. 그림 6(a)는 실리카 클래딩을 갖는 2차원 실리콘 광자 결정 슬랩 (실리카/실리콘 광자 결정/실리카)의 모식도이다. 그림과 같이 구멍의 내부까지 실리카로 충전되어 있는 대칭적인 구조를 가지고 있으며, 실리카 굴절률  $n=1.44$ <sup>[5]</sup>로 가정하였다. 그림 6(b)는 슬랩의  $r=0.29a$ ,  $t=0.6a$  일 때 실리카 클래딩을 갖는 2차원 실리콘 광자 결정 슬랩의 밴드 다이어그램을 계산한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 실리카 클래딩 구조의 광자 밴드갭은 공기 클래딩 구조(그림 1(b))에 비해 낮은 주파수 영역인 0.25~0.29  $[c/a]$  영역에서 존재한다. 이는 실리카 클래딩 구조의 유효 굴절률이 공기 클래딩 구조에 비해 다소 높기 때문에 광자 밴드갭이 낮은 주파수로 이동한 것이다. 또한, 실리카 클래딩 구조의 광자 밴드갭이 공기 클래딩 구조에 비해 다소 줄어들었음을 알 수 있다. 이는 공기 클래딩에 비해 실리카 클래딩과 실리콘 슬랩의 상대적 굴절률 차이가 줄었기 때문이다. 그러나,  $a=420$  nm로 가정한 실리카 클래딩 구조의 광자 밴드갭은 1450~1680 nm 파장 대역에 해당하며, 광통신 파장대역을 충분히 포함하고 있다.

앞 결과 마찬가지로  $r$ 과  $t$ 에 따른 실리카 클래딩을 갖는 2

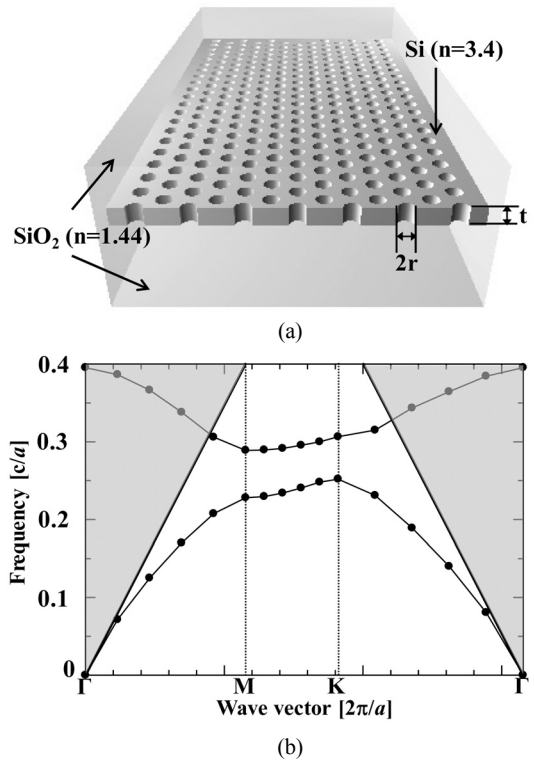


Fig. 6. (a) Schematic and (b) photonic band diagram of a 2-D Si PC slab with silica cladding ( $r=0.29a$ ,  $t=0.6a$ ).

차원 실리콘 광자 결정 슬랩의 밴드 다이어그램을 계산한 결과가 각각 그림 7(a)와 그림 7(b)이다. 그림에서  $r$ 과  $t$ 에 따른 실리카 클래딩을 갖는 2차원 실리콘 광자 결정 슬랩의 밴드 다이어그램 변화는 그림 2의 공기 클래딩 구조의 밴드 다이어그램 변화와 유사한 특성을 가짐을 알 수 있다. 다만, 실리카 클래딩 구조의 밴드 다이어그램은 실리카 굴절률로 인해 공기 클래딩 구조의 결과에 비해 광자 밴드갭의 주파수가 낮아지고 광자 밴드갭이 다소 좁아진다.

위의 계산 결과를 통해 실리카 클래딩을 갖는 2차원 실리콘 광자 결정 슬랩에서도 광통신 파장 영역을 충분히 포함하는 광자 밴드갭이 형성됨을 알았다. 따라서 그림 8(a)와 같이 실리카 클래딩을 갖는 2차원 실리콘 광자 결정 도파로 구조의 도파 모드 특성에 대해서 살펴보았다. 그림 8(b)는  $W_d=W1$ ,  $r=0.29a$ ,  $t=0.6a$  일 때 실리카 클래딩을 갖는 2차원 실리콘 광자 결정 도파로의 분산 관계를 나타낸 것이다. 무손실 도파 대역은 0.255~0.258  $[c/a]$ 의 주파수 영역에서 존재하며, 파장으로 환산하면 약 18 nm에 해당하는 매우 좁은 도파 파장 대역이다. 이와 같이 실리카 클래딩을 갖는 2차원 실리콘 광자 결정 도파로에서 좁은 무손실 도파 대역을 갖는 이유는 공기보다 굴절률이 큰 실리카 light line의 영향으로 무손실 도파 대역이 줄어들기 때문이다.

따라서, 실리카 클래딩을 갖는 2차원 실리콘 광자 결정 도파로의 무손실 도파 대역을 넓히기 위해서 공기 클래딩 구조의 그림 4(b)와 유사하게 실리콘 슬랩  $t$ 를 두껍게 하여 실리카 light line의 영향을 줄이고자 하였다. 표 1은 실리카 클래

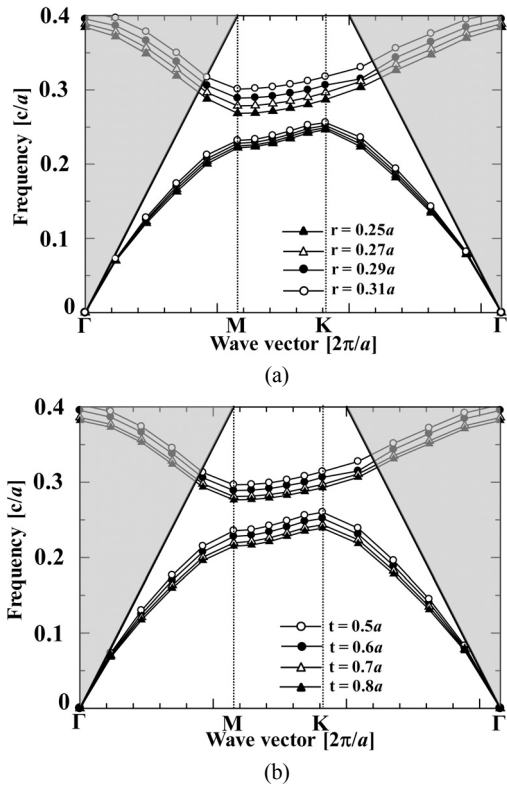


Fig. 7. (a) Photonic band diagrams versus various (a) hole radius ( $t=0.6a$ ) and (b) slab thickness ( $r=0.29a$ ) in a 2-D Si PC slab with silica cladding.

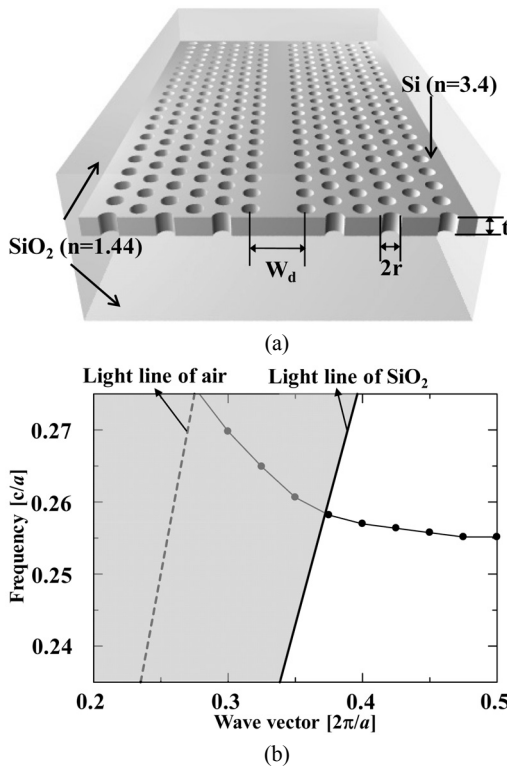


Fig. 8. (a) Schematic and (b) photonic band diagram of 2-D Si PC slab waveguide with silica cladding ( $W_d=W_1$ ,  $r=0.29a$ ,  $t=0.6a$ ).

Table 1. Transmission bandwidth versus various slab thickness of a 2-D Si PC slab waveguide ( $r=0.29a$ ,  $W_d=W_1$ ) with silica cladding

Slab thickness	Transmission bandwidth [nm]
$0.6a$	18
$0.7a$	31
$0.8a$	25

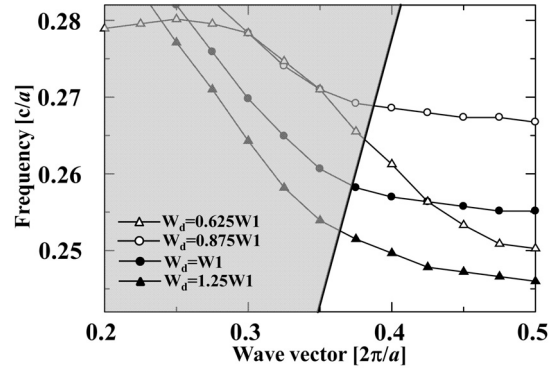


Fig. 9. Photonic band diagram versus various waveguide width in a 2-D Si PC slab waveguide with silica cladding ( $r=0.29a$ ,  $t=0.6a$ ).

딩을 갖는 2차원 실리콘 광자 결정 도파로가  $W_d=W_1$ ,  $r=0.29a$ 일 때, 실리콘 슬랩  $t$ 의 증가에 따른 무손실 도파 대역을 계산하여 파장으로 환산한 결과이다. 표 1에서 알 수 있듯이,  $t=0.7a$ 일 때 무손실 도파 대역은 다소 증가했으나 공기 클래딩 구조와 비교하면 약 1/3 정도에 지나지 않는다. 또한,  $t=0.8a$ 에서는 고주파수 대역에 다중 모드가 형성되어 도파 대역이 다소 감소하였다. 따라서, 무손실 도파 대역에 민감한  $W_d$  변화에 따른 무손실 도파 대역을 계산할 필요가 있다.

그림 9는  $r=0.29a$ ,  $t=0.6a$ 일 때  $W_d$  변화에 따른 실리카 클래딩을 갖는 2차원 광자 결정 도파로의 분산 관계를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, 실리카 클래딩 구조를 갖는 도파로에서 공기 클래딩 도파로와 유사하게  $W_d=0.625W_1$ 일 때, 군속도가 큰 새로운 도파 모드가 형성된다. 무손실 도파 주파수 대역은  $a=400$  nm로 가정하면 약 1510~1600 nm 파장 대역에 해당하며, 공기 클래딩 구조에 버금가는 우수한 광학적 특성을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 기계적 강도를 향상시킨 저굴절률 실리카 클래딩( $n=1.44$ )을 갖는 2차원 실리콘 광자 결정의 광자 밴드 갭과 도파로 특성을 3차원 유한 차분 시간 영역법을 이용하여 계산하였다. 공기 클래딩( $n=1$ )을 갖는 2차원 실리콘 광자 결정 슬랩 구조에서 약 330 nm의 광자 밴드갭( $r=0.29a$ ,  $t=0.6a$ )과 약 100 nm의 무손실 도파 파장 대역을 갖는 도파

로( $W_d=W1$ ,  $r=0.29a$ ,  $t=0.6a$ )를 설계하였다. 이를 바탕으로 공기보다 다소 굴절률이 높은 실리카 클래딩을 갖는 2차원 실리콘 광자 결정 슬랩 구조를 설계한 결과, 약 230 nm의 광자 밴드갭( $r=0.29a$ ,  $t=0.6a$ )과 약 90 nm 무손실 도파 파장 대역을 갖는 도파로( $W_d=0.625W1$ ,  $r=0.29a$ ,  $t=0.6a$ )를 설계하였다. 이러한 결과는 공기 클래딩을 갖는 2차원 실리콘 광자 결정 슬랩 구조에 비해 손색이 없는 광학적 특성으로서, 외부 도파로 및 센서 등을 집적화할 수 있는 초소형 광소자 분야의 응용이 기대된다.

### 감사의 글

본 연구는 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2007-331-C00115)과 한국 과학재단(KOSEF-R11-2003-022)의 일부 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다. 또한, 이 연구의 주요 계산은 한국과학기술정보연구원(KISTI)이 무상으로 제공한 슈퍼컴퓨팅 자원을 이용하여 수행되었습니다.

### References

1. B. S. Song, S. Noda, T. Asano, and Y. Akahane, "Ultra-high-Q photonic double-heterostructure nanocavity," *Nature materials* **4**, 207-210 (2005).
2. Y. Akahane, T. Asano, B. S. Song, and S. Noda, "High-Q photonic nanocavity in a two-dimensional photonic crystal," *Nature* **425**, 944-947 (2003).
3. E. Chow, S. Y. Lin, S. G. Johnson, P. R. Villeneuve, J. D. Joannopoulos, J. R. Wendt, G. A. Vawter, W. Zubrzycki,

- H. Hou, and A. Alleman, "Three-dimensional control of light in a two-dimensional photonic crystal slab," *Nature* **407**, 983-986 (2000).
4. M. Qiu, "Band gap effects in asymmetric photonic crystal slabs," *Phys. Rev. B* **66**, 033103-033106 (2002).
5. Y. Tanaka, T. Asano, R. Hatsuta, and S. Noda, "Analysis of a line-defect waveguide on a silicon-on-insulator two-dimensional photonic-crystal slab," *J. Lightwave Technol.* **22**, 2787-2792 (2004).
6. M. Notomi, A. Shinya, K. Yamada, J. Takahashi, C. Takahashi, and I. Yokohama, "Structural tuning of guiding modes of line-defect waveguides of silicon-on-insulator photonic crystal slabs," *IEEE J. Quantum Electron.* **38**, 736-742 (2002).
7. K. Yamada, H. Morita, A. Shinya, and M. Notomi, "Improved line-defect structures for photonic-crystal waveguides with high group velocity," *Opt. Comm.* **198**, 395-402 (2001).
8. T. P. White, L. O'Faolain, J. Li, L. C. Andreani, and T. F. Krauss, "Silica-embedded silicon photonic crystal waveguides," *Opt. Exp.* **16**, 17076-17081 (2008).
9. K. S. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media," *IEEE Trans. Antennas Propagat.* **AP-14**, 302-307 (1966).
10. G. Mur, "Absorbing boundary conditions for the finite-difference approximation of the time-domain electromagnetic-field equations," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **EMC-23**, 377-382 (1981).
11. A. Chutinan and S. Noda, "Waveguides and waveguide bends in two-dimensional photonic crystal slabs," *Phys. Rev. B* **62**, 4488-4492 (2000).