

## TeO<sub>x</sub>(2 < x < 3)/SiO<sub>2</sub> 1차원 광자결정의 광학 특성평가

공 현<sup>1</sup>, 여종빈<sup>2</sup>, 이현용<sup>2,a</sup>

<sup>1</sup> 전남대학교 신화학소재공학과

<sup>2</sup> 전남대학교 응용화학공학과

## Optical Properties of TeO<sub>x</sub>(2 < x < 3)/SiO<sub>2</sub> One-dimensional Photonic Crystals

Heon Kong<sup>1</sup>, Jong-Bin Yeo<sup>2</sup>, and Hyun-Yong Lee<sup>2,a</sup>

<sup>1</sup> Department of Advanced Chemicals and Engineering, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

<sup>2</sup> School of Applied Chemical Engineering, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

(Received November 10, 2014; Revised November 24, 2014; Accepted November 24, 2014)

**Abstract:** One-dimensional (1D) photonic crystals (PCs) were prepared by TeO<sub>x</sub>(2 < x < 3)/SiO<sub>2</sub> with the difference refractive index, and fabricated by sputtering technique from a TeO<sub>2</sub> and SiO<sub>2</sub> target. The TeO<sub>x</sub>(2 < x < 3) layers were fabricated by using the sputtering gas ratio (Ar:O<sub>2</sub>=40:10). A 10-pair TeO<sub>x</sub>(2 < x < 3)/SiO<sub>2</sub> 1D PCs were fabricated with the structure parameters of filling factor=0.5185, and period=410 nm. The properties of 1D PCs with and without a defect layer were evaluated by UV-VIS-NIR. A normal mode 1D PC have a photonic band gap (PBG) in the near infrared (NIR) region from 1,203 to 1,421 nm. In the case of 1D PC containing a defect layer, a defect level appears at 1,291 nm. The measured transmittance (T) spectra are nearly corresponding to calculated results. After He-Cd laser exposure, the defect level is shifted from 1,291 nm to 1,304 nm.

**Keywords:** One-dimensional photonic crystals, Photonic band gap, Tellurium oxide, Filter

### 1. 서론

자연계 내의 특이한 현상들을 이용하여 공학에 응용하려는 연구가 계속되고 있으며, 광학 분야에서는 빛의 흐름을 제어할 수 있는 인공적 구조인 광자결정 (photonic crystals, PCs)에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다 [1,2].

광자결정은 서로 다른 유전율 혹은 굴절률 차이를 갖는 물질의 주기적인 배열을 말하며, 일반적으로 1차원, 2차원, 3차원 광자결정과 같이 세가지 타입으로 분류된다. 이를 이용하여 설계된 광자결정은 전자 밴드갭 (electronic band gap)과 유사한 개념인 특정 주파수 대역에서 광이 전파되지 않는 광자 밴드갭 (photonic band gap, PBG)을 형성한다 [3,4].

주기성 배열을 갖는 광자결정 내에 주기성을 깨는 결함 (defect) 구조를 만들면, 광자밴드갭 내에 광이 통과하는 주파수 대역이 생긴다 [5-7]. 이러한 광자밴드갭 내에 결함준위는 잠재적인 광소자로의 응용성 때문에 많은 관심을 받고 있다. 2차원, 3차원 광자결

a. Corresponding author: hyleee@chonnam.ac.kr

Copyright ©2014 KIEEME. All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

정과 마찬가지로 1차원 광자결정은 광밴드갭 내에 국소적인 결합모드 제작이 가능하다. 또한 1차원 광자결정은 2차원, 3차원 광자결정에 비해 제작이 용이하여 스플리터 (splitter), 광 필터 (filter), 레이저와 같은 다양한 응용 연구가 이루어지고 있다 [8-10].

본 연구에서는 서로 다른 굴절률을 가지는  $\text{TeO}_x$  ( $2 < x < 3$ )와  $\text{SiO}_2$ 로 구성된 10-쌍 (10-pair)의 정상모드 (normal mode)와 결합층이 삽입된 결합모드 (defect mode)의 1차원 광자결정을 제작하여 TMM (transfer matrix method)을 활용한 시뮬레이션과 UV-VIS-NIR (ultraviolet visible near-infrared spectrophotometer, Varian, Cary 500, U.S.A.) 측정을 통하여 광밴드갭 결과를 비교 고찰하였다 [11]. 또한 결합모드로 제작된 1차원 광자결정에 대하여 광노출 후 광밴드갭 변화를 확인하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 1차원 광자결정 물질 선택

본 연구에 적용된 1차원 광자결정 구조체는 RF 스퍼터링 기법을 활용한  $\text{TeO}_x$  ( $2 < x < 3$ )와  $\text{SiO}_2$  박막들로 구성하였다.  $\text{TeO}_x$  ( $2 < x < 3$ )와  $\text{SiO}_2$  박막에 대한 스퍼터링 조건을 표 1에 나타내었다.

우선, 1차원 광자결정 구조체를 제작하기 위하여,  $\text{TeO}_x$  ( $2 < x < 3$ )와  $\text{SiO}_2$  박막들에 대한 최적의 스퍼터링 조건을 확립하였다.  $\text{TeO}_x$  ( $2 < x < 3$ )와  $\text{SiO}_2$  박막 제작을 위한 스퍼터링은 각각 순도 99.99%인 4N급  $\text{TeO}_2$ 와  $\text{SiO}_2$  타겟을 활용하여 p-type Si (100) 기판위에 성막하였다. 사용되어진 실리콘 기판 표면의 오염을 제거하기 위하여 아세톤 (acetone), 트리클로로에틸렌 (trichloroethylene), 이소프로필알코올 (iso-propyl alcohol), 탈이온화수 (DI water) 순서로 초음파세척기에서 10분 간 실시하였다. 균일한 박막 제작을 위해 기판은 회전하면서 성막하였다. 또한, 스퍼터링 타겟 표면의 산화 및 불순물에 의한 영향을 최소화하기 위하여 15분 동안 예비 스퍼터링 (pre-sputtering)을 실시하였다.

$\text{SiO}_2$  박막은 아르곤(Ar) 가스를 흘려주면서 RF 마그네트론 스퍼터링 기법으로 제작하였다. 하지만  $\text{TeO}_x$  박막은 스퍼터링 가스조성비에 따라 물리적·광학적 특성이 다른 박막이 성막된다 [12].  $\text{TeO}_x$  박막은 스퍼터링 가스조성비에 대한 실험을 통하여 2

Table 1. RF sputtering parameters.

Thin film	Sputtering parameters	Conditions
$\text{TeO}_x$ ( $2 < x < 3$ )	Target	$\text{TeO}_2$
	Ar : $\text{O}_2$ gas ratio (sccm)	40:10
	Power (W)	50
	Working pressure (Torr)	$10^{-3}$
	Substrate temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	RT
$\text{SiO}_2$	Target	$\text{SiO}_2$
	Ar : $\text{O}_2$ gas ratio (sccm)	40:0
	Power (W)	150
	Working pressure (Torr)	$10^{-3}$
	Substrate temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	RT

$< x < 3$  범위를 갖는 스퍼터링 성막 조건을 적용하였다.  $\text{TeO}_x$  ( $2 < x < 3$ ) 박막은 스퍼터링 가스 총 유량을 50 sccm으로 고정한 상태에서 스퍼터링 가스조성비를 Ar:  $\text{O}_2$  = 40:10 비율로 진행함으로써 얻을 수 있었다. 제작된 박막들의 조성과 굴절률에 대한 정보는 XPS (X-ray photoelectron spectroscopy, SSK, Multilab 2000 system, U.S.A.), Ellipsometer (Ellipsometer, Jobin Yvon Sas, Uvisel/M200VISMGMs, France) 측정을 통하여 밝혔다.

$\text{TeO}_x$  ( $2 < x < 3$ ) 박막에 대한 결합에너지와 화학 조성비는 XPS에 의해 분석되었다.  $\text{TeO}_x$  ( $2 < x < 3$ ) 박막의 XPS 결과를 그림 1에 나타냈다. Ar과  $\text{O}_2$ 의 스퍼터링 가스조성비가 40:10으로 성막된  $\text{TeO}_x$  박막의 결합에너지를 확인하기 위해서 O 1s [그림 1(a)]와 Te 3d<sub>5/2</sub> [그림 1(b)]에 대응하는 피크를 활용하였다. 기존에 보고된 XPS 분석 결과를 살펴보면 Te 3d<sub>5/2</sub>는  $\text{TeO}_x$  ( $1 < x < 2$ ) 박막 [13]에서 대략 573 eV와 576 eV에서 2개의 피크가 확인되었고,  $\text{TeO}_x$  ( $2 < x < 3$ ) 박막[12]은 대략 576 eV에서만 피크가 확인되었다. 573 eV에 대응하는 피크는 Te-Te 결합에 의한 것이고, 576 eV에 대응하는 피크는 Te-O 결합에 의한 것이다. 본 연구를 통해 측정된  $\text{TeO}_x$  박막은 576.7 eV에서 Te 3d<sub>5/2</sub> 피크가 존재하였고, Te-O 결합만 존재함을 알 수 있었다. 따라서 이번 연구에서 성막된  $\text{TeO}_x$  박막은  $2 < x < 3$  범위를 가지는 것을 알 수 있으며, XPS 분석을 통하여 확인된 O 1s와 Te 3d<sub>5/2</sub> 피크 면적으로 계산된  $\text{TeO}_x$  박막의 화학조성비는 2.33 값을 가졌다.

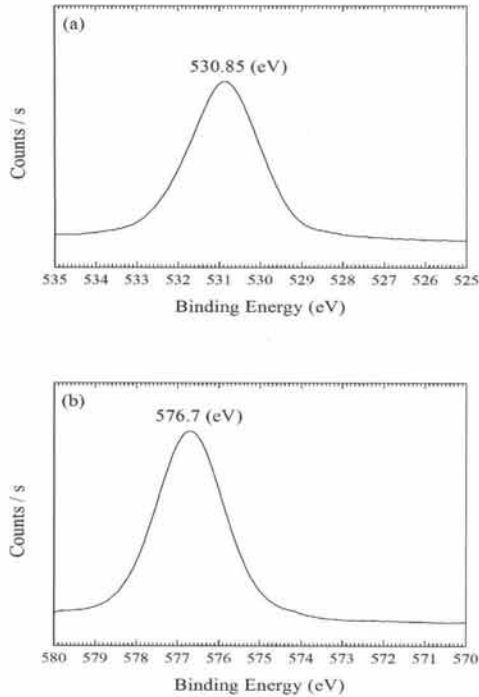


Fig. 1. XPS spectra of (a) O 1s, and (b) Te 3d<sub>5/2</sub> for TeO<sub>x</sub> (2 < x < 3) thin film.

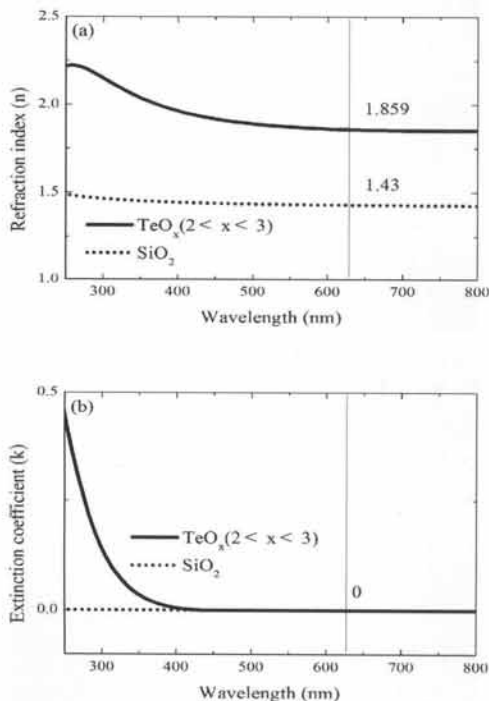


Fig. 2. (a) Refraction index, and (b) extinction coefficient of TeO<sub>x</sub> (2 < x < 3), and SiO<sub>2</sub> thin films.

그림 2는 Ellipsometer (Ellipsometer, Jobin Yvon Sas, Uvisel/M200VISMGMs, France) 분석을 통해 측정된 TeO<sub>x</sub> (2 < x < 3) 박막과 SiO<sub>2</sub> 박막에 대한 굴절률 (refraction index, *n*) [그림 2(a)]과 소광계수 (extinction coefficient, *k*) [그림 2(b)]이다. 그림 2(a)와 (b)에서와 같이 TeO<sub>x</sub> (2 < x < 3) 박막과 SiO<sub>2</sub> 박막의 복소굴절률은 633 nm에서 각각 1.859+i0, 1.43+i0으로 확인되었다.

### 2.2 1차원 광자결정 구조 제작

위의 표 1에서와 같은 스퍼터링 조건으로 제작된 TeO<sub>x</sub> (2 < x < 3) 박막과 SiO<sub>2</sub> 박막을 활용하여 1차원 광자결정 구조체를 제작하였으며, 정상모드와 더불어 광자결정 내부에 결함층을 삽입한 결함모드도 함께 제작하였다.

여기서 제작된 1차원 광자결정의 구조 매개변수 (*n<sub>H</sub>*, *n<sub>L</sub>*, *n<sub>D</sub>*, *d<sub>H</sub>*, *d<sub>L</sub>*, *d<sub>D</sub>*, *n*, *Λ*, *N*)는 다음과 같다. *n<sub>H</sub>*는 고굴절률을 갖는 TeO<sub>x</sub> (2 < x < 3) 박막의 굴절률이며, *n<sub>L</sub>*은 저굴절률의 SiO<sub>2</sub> 박막에 대한 굴절률을 나타낸다. 정상모드와의 비교를 위해 결함모드 중간에 삽입된 TeO<sub>x</sub> (2 < x < 3) 박막층에 대한 굴절률은 *n<sub>D</sub>*으로 표현했다. 고굴절률을 갖는 TeO<sub>x</sub> (2 < x < 3) 및 저굴절률을 갖는 SiO<sub>2</sub> 박막에 대한 두께는 각각 *d<sub>H</sub>*, *d<sub>L</sub>*로 표기하였고, 결함모드 중간에 삽입된 단일 결함층 TeO<sub>x</sub> (2 < x < 3) 박막에 대한 두께는 *d<sub>D</sub>*로 나타냈다. 1차원 광자결정 구조체의 기본이 되는 주기는 *Λ*로 표기하였고, *d<sub>H</sub>*, *d<sub>L</sub>*의 합을 의미한다. *N*은 TeO<sub>x</sub> (2 < x < 3) 박막과 SiO<sub>2</sub> 박막으로 이루어진 반복되어지는 주기 (*Λ*)의 쌍수 (number of pairs)를 의미한다. 또한 1차원 광자결정 구조체의 두 교변층에 대한 두께 비 (*d<sub>H</sub>*/*d<sub>L</sub>*)인 충전율 (filling factor)은 *η*으로 표기하였다.

그림 3(a)는 TeO<sub>x</sub> (2 < x < 3)/SiO<sub>2</sub>로 구성된 1차원 광자결정 정상모드(normal mode)의 모식도이다. 정상모드는 주기(*Λ*)가 10쌍 (10-pair)을 갖는 *N*=10으로 제작하였다. TeO<sub>x</sub> (2 < x < 3) 박막과 SiO<sub>2</sub> 박막의 두께는 각각 *d<sub>H</sub>*= 140 nm, *d<sub>L</sub>*= 270 nm로 제작하였으며 주기 (*Λ*= *d<sub>H</sub>*+*d<sub>L</sub>*)는 410 nm, 충전율 (*η*)은 대략 0.5185의 값을 가졌다. *n<sub>H</sub>*, *n<sub>L</sub>*에 대응하는 TeO<sub>x</sub> (2 < x < 3), SiO<sub>2</sub> 굴절률은 Ellipsometer에 의해 측정된 복소굴절률 (*n<sub>H</sub>*= 1.859+i0, *n<sub>L</sub>*= 1.43+i0)을 기준으로 하였다. 1,200 nm 이상의 적외선(IR) 영역에서는 소광계수 (*k*)가 작으므로 분산특성을 무시할 수 있다. 따

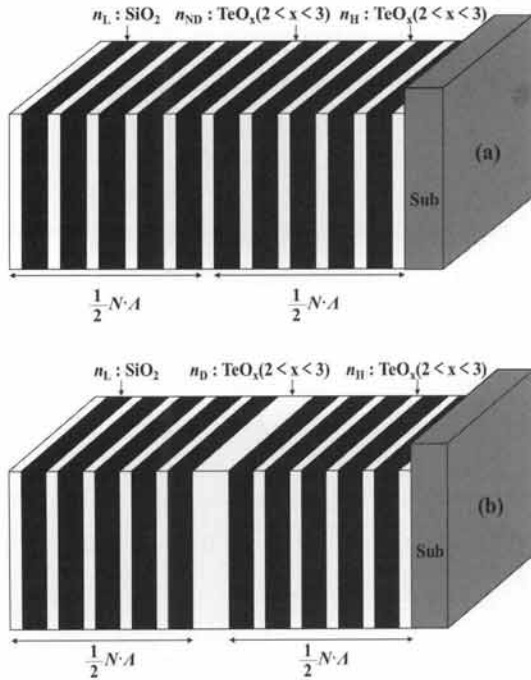


Fig. 3. Schematic diagrams of  $\text{TeO}_x$  ( $2 < x < 3$ )/ $\text{SiO}_2$  1D PCs (a) normal mode, and (b) defect mode.

라서 1차원 광자결정 구조체의 계산을 위한 굴절률은 Ellipsometer로 측정된 복소굴절률 중 실수부의 값을 적용할 수 있으며,  $n_H, n_L$ 은 각각  $n_{\text{TeO}_x(2 < x < 3)} = 1.859, n_{\text{SiO}_2} = 1.43$ 을 적용하였다 [9,11,14]. 또한, 입사 매질 air 및 기판의 굴절률은  $n = 1, n_s = 1.457$ 로 가정하였다 [15].

$\text{TeO}_x$  ( $2 < x < 3$ )/ $\text{SiO}_2$ 로 구성된 1차원 광자결정 결함모드 (defect mode)의 모식도는 그림 3(b)에 나타내었다. 결함모드의 단일 결함층은  $\text{TeO}_x$  ( $2 < x < 3$ ) 박막을 사용하였으며,  $d_D = 310 \text{ nm}$ 의 두께로 제작하였다. 결함모드는 정상모드와의 비교를 위하여 결함층 두께 이외에는 동일한 구조 매개변수 값으로 제작하였다.

### 2.3 1차원 광자결정 특성 분석

Fused quartz 기판 위에 제작된 1차원 광자결정 구조체의 광밴드갭 특성을 확인하기 위하여 모드(정상모드, 결함모드)별로 UV-VIS-NIR 측정을 하였다. 제작된 샘플은 200~2,000 nm 파장 범위에서 입사각  $0^\circ$ 의 비편광빔 모드로 투과도를 측정하였고 결함모드

내의 결함층 삽입에 따른 영향을 분석함으로써 정상모드와의 비교 고찰을 실시하였다. 또한, TMM (transfer matrix method)을 활용하여 시뮬레이션함으로써 측정된 광학 특성 결과값과의 비교를 하였다. 또한 결함모드로 제작된 1차원 광자결정에 대하여 광노출 후 광밴드갭 변화를 확인하였다. 결함모드를 갖는 1차원 광자결정은 He-Cd ( $\lambda = 325 \text{ nm}$ ) laser 노출 전후에 따른 광학 특성 변화도 평가하였다.

### 3. 결과 및 고찰

그림 4(a)와 (b)는 각각 10-쌍 (10-pair)로 제작된 1차원 광자결정에 대한 정상모드와 결함모드의 SEM 이미지이다. SEM 측정을 통한 두께 확인 시 모든 박막의 두께는  $\pm 5\%$  오차 범위 이내에서 잘 성막되었음을 확인할 수 있었다. p-Si (100) 기판 위에서 제작된  $\text{TeO}_x$  ( $2 < x < 3$ )/ $\text{SiO}_2$  1차원 광자결정에 대한 이미지 내에서 밝은색을 띠는 부분이  $\text{TeO}_x$  ( $2 < x < 3$ ) 박막이고, 어두운색을 띠는 부분이  $\text{SiO}_2$  박막이다.

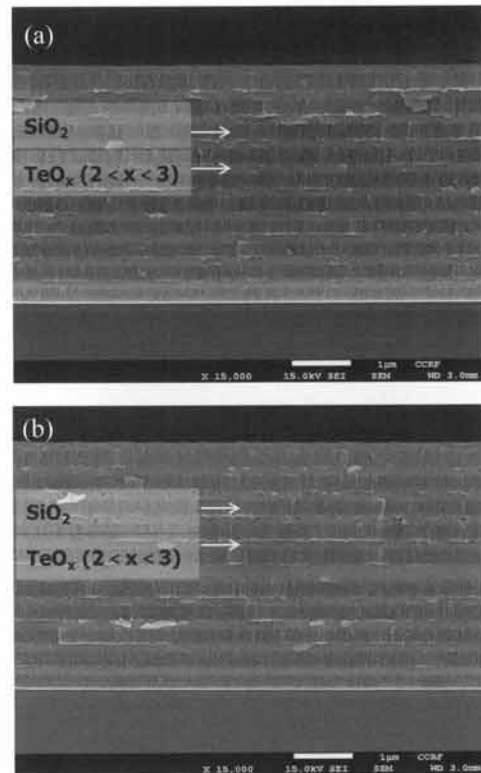


Fig. 4. SEM images of 1D PCs (a) normal mode, and (b) defect mode fabricated by  $\text{TeO}_x$  ( $2 < x < 3$ ), and  $\text{SiO}_2$ .

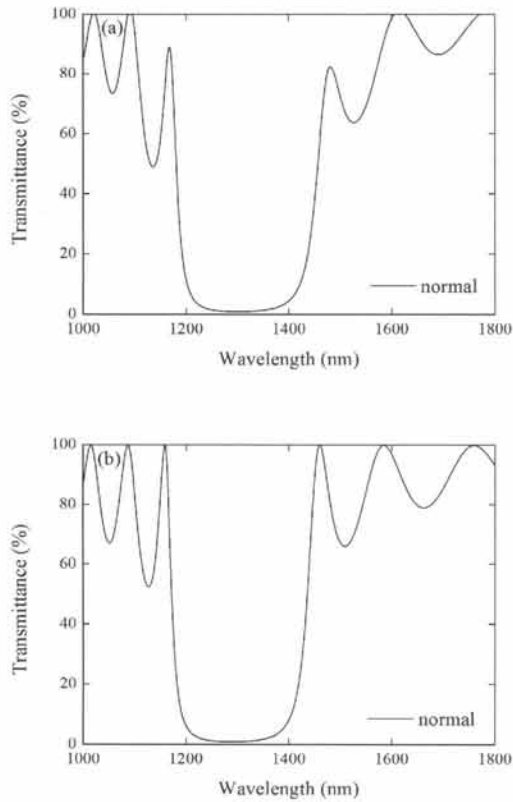


Fig. 5. The (a) measured and (b) calculated transmittance spectra of  $\text{TeO}_x$  ( $2 < x < 3$ )/ $\text{SiO}_2$  1D PCs normal mode.

그림 5는  $N=10$ ,  $d_H=140$  nm,  $d_L=270$  nm,  $n=0.5185$ 의 구조 매개변수 값을 갖는  $\text{TeO}_x$  ( $2 < x < 3$ )/ $\text{SiO}_2$  1차원 광자결정 정상모드에 대한 투과도 그래프이다. 본 연구에서 제작되어진  $\text{TeO}_x$  ( $2 < x < 3$ )/ $\text{SiO}_2$  1차원 광자결정 정상모드의 광경로는  $\text{air} \rightarrow 1/2 \cdot N \cdot \Lambda \rightarrow d_H \rightarrow 1/2 \cdot N \cdot \Lambda \rightarrow$  기관 형태로 진행한다. 그림 5(a)는 UV-VIS-NIR 측정을 통하여 실측된 투과도 그래프를 나타낸다. 투과도 10% 미만을 급지대 영역의 기준으로 하면 1203~1421 nm 파장 범위에서 투과도는 0에 가까운 값을 가졌다. 이를 통하여 218 nm 구간의 주파수에서는 광이 1차원 광자결정을 통해 전파할 수 없는 반사 구조인 광밴드갭이 형성됨을 알 수 있다. 그림 5(b)는 TMM-MathCAD로 계산된 투과도를 나타낸다. 본 연구에서 제작된 1차원 광자결정 구조체에 대한 TMM-MathCAD 계산은 입사 및 기관층에서의 변형은 배제하고 계산하였으며, 1,192~1,404 nm 파장 범위 내 212 nm 구간에서

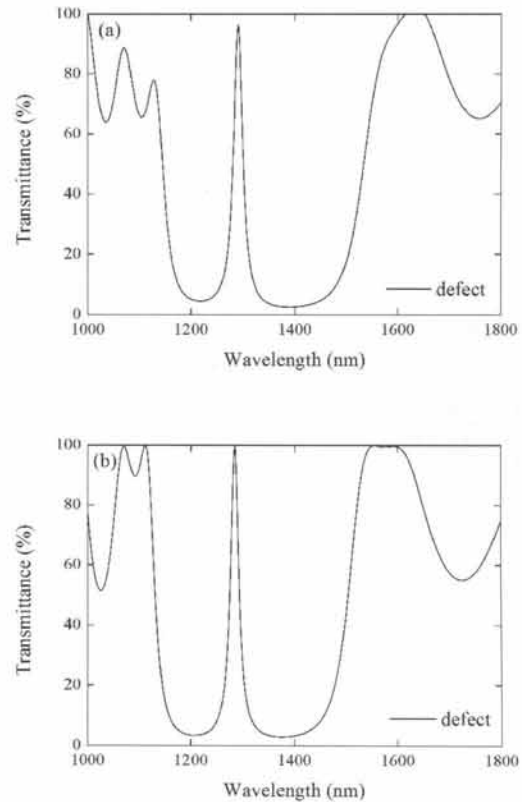
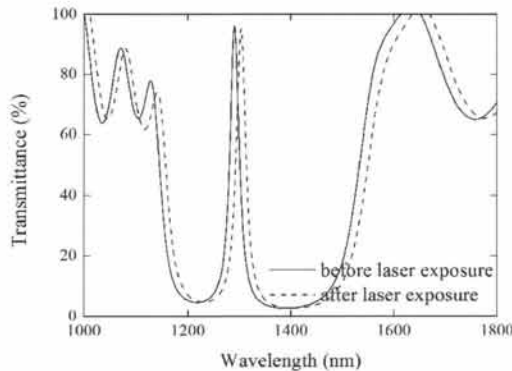


Fig. 6. The (a) measured and (b) calculated transmittance spectra of  $\text{TeO}_x$  ( $2 < x < 3$ )/ $\text{SiO}_2$  1D PCs defect mode.

투과도 10% 미만인 광밴드갭이 형성됨을 확인하였다. 그림 5(a)와 (b)에서와 같이 측정된 투과도와 계산된 결과값은 거의 일치함을 보였다.

그림 6은 단일 결함층을 갖는 10-pair  $\text{TeO}_x$  ( $2 < x < 3$ )/ $\text{SiO}_2$  1차원 광자결정 결함모드의 투과도이다. 단일 결함층을 포함하는  $\text{TeO}_x$ ( $2 < x < 3$ )/ $\text{SiO}_2$  1차원 광자결정 결함모드는  $\text{air} \rightarrow 1/2 \cdot N \cdot \Lambda \rightarrow d_D(\text{defect}) \rightarrow 1/2 \cdot N \cdot \Lambda \rightarrow$  기관 형태의 광경로를 갖는다. 단일 결함층을 삽입함으로써 광밴드갭 내에 100%에 가까운 침예한 투과도를 갖는 영역이 나타났다. UV-VIS-NIR에 의한 측정된 투과도는 1,291 nm에서 96.2%의 값을 보였으며 [그림 6(a)],

TMM-MathCAD로 계산된 결과값은 1,284 nm에서 99.7%를 보였다 [그림 6(b)]. 정상모드와 마찬가지로 결함 모드 역시 TMM-MathCAD를 활용하여 계산된 결과값은 UV-VIS-NIR에 의해 측정되어진 투과도와 거의 일치하였다. 위의 결과는 단일 결함층을 갖는 광자결정에서는 광밴드갭 내에 단일 결함 준위가 형성됨을 의미한다.



**Fig. 7.** The transmittance spectra of  $\text{TeO}_x$  ( $2 < x < 3$ )/ $\text{SiO}_2$  1D PCs defect mode before, and after laser exposure.

이처럼 1차원 광자결정 설계에 따라 원하는 파장 범위에서 광밴드갭을 생성할 수 있고, 광자결정 내부에 결함층을 삽입함으로써 광밴드갭 내에 결함 준위도 생성할 수 있음을 의미한다. 특정 주파수 영역에서의 광밴드갭 및 결함준위를 활용함으로써 광학필터, 광학 스위치 등 광응용 부품 응용의 가능성을 확인하였다. 10-쌍(10-pair)  $\text{TeO}_x$  ( $2 < x < 3$ )/ $\text{SiO}_2$  1차원 광자결정 결함구조에 대하여 광조사에 따른 광학적 특성 변화를 확인하였다. 광조사 장치의 광원은 325 nm 파장의 He-Cd 레이저를 사용하였고, 미러, 셔터, 핀홀, 대물렌즈, 콜리메이터로 구성하였다. 광조사 장치를 조합, 조절함으로써 He-Cd 레이저 광원이 균일하게 조사되도록 하였다.

그림 7은 1차원 광자결정 결함모드에 대한 광조사 전후의 투과도 변화를 나타낸 그래프이다. 광조사는 325 nm 파장의 He-Cd 레이저로 6시간 동안 진행하였고, 광조사 후 결함층에 의한 첨예한 결함준위는 1,291 nm에서 1,304 nm로 13 nm 정도 장파장쪽으로 이동하였다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 스퍼터링 기법을 활용하여 10-pair  $\text{TeO}_x$  ( $2 < x < 3$ )/ $\text{SiO}_2$  1차원 광자결정 구조체를 정상 모드와 결함모드를 제작하여 광밴드갭과 결함준위에 대한 고찰을 하였다.  $N=10$ ,  $\Lambda=410$  nm,  $n=0.5185$ 의 제작 매개변수 값을 갖는 10-pair  $\text{TeO}_x$  ( $2 < x < 3$ )/ $\text{SiO}_2$  1차원 광자결정의 정상모드에서는 광밴드

갭이 형성되었고, 결함모드에서는 단일 결함층  $d_D=310$  nm의 영향으로 광밴드갭 내의 첨예한 결함준위가 존재하였다. 실측된 투과도는 TMM-MathCAD를 활용하여 계산되어진 결과값과 거의 일치함을 보였다. He-Cd 레이저 ( $\lambda=325$  nm)를 활용한 광조사를 통하여 결함준위는 red-shift 경향을 보였다.

본 연구를 통해서 얻어진  $\text{TeO}_x$  ( $2 < x < 3$ )/ $\text{SiO}_2$  1차원 광자결정은 광가변적인 광학필터 등 광학 기기의 응용이 가능하리라 생각한다.

#### 감사의 글

본 연구는 2012년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. 2012R1A6A3A037897, 2012K1A1A4A01015683)으로 수행된 연구임.

#### REFERENCES

- [1] E. Yablomovitch, *Phys. Rev. Lett.*, 58, 2059 (1987).
- [2] S. John, *Phys. Rev. Lett.*, 58, 2486 (1987).
- [3] E. Yablonovitch, *J. Opt. Soc. Am. B*, 10, 283 (1993).
- [4] E. Yablonovitch, *J. Mod. Opt.*, 41, 173 (1994).
- [5] J. D. Joannopoulos, P. Villeneuve, and S. Fan, *Nature*, 386, 143 (1997).
- [6] H. Jiang, H. Chen, H. Li, Y. Zhang, and S. Zhu, *Appl. Phys. Lett.*, 83, 5386 (2003).
- [7] A. H. Aly and H. A. Elsayed, *Physica B*, 407, 120 (2012).
- [8] Z. M. Jiang, B. Shi, D. T. Zhao, J. Liu, and X. Wang, *Appl. Phys. Lett.*, 79, 3395 (2001).
- [9] H. Y. Lee, H. Makino, T. Yao, and A. Tanaka, *Appl. Phys. Lett.*, 81, 4502 (2002).
- [10] M. W. Feise, I. V. Shadrivov, and T. S. Kivshar, *Phys. Rev. E*, 71, 037602 (2005).
- [11] H. Y. Lee and T. Yao, *J. Appl. Phys.*, 93, 819 (2003).
- [12] N. Dewan, V. Gupta, K. Sreenivas, and R. S. Katiuar, *J. Appl. Phys.*, 101, 084910 (2007).
- [13] M. Takenaga, N. Yamada, K. Nishiuchi, N. Akahira, T. Ohta, S. Nakamura, and T. Yamashita, *J. Appl. Phys.*, 54, 5376 (1983).
- [14] H. Y. Lee, S. J. Cho, and G. Y. Nam, *J. Appl. Phys.*, 97, 103111 (2005).
- [15] W. S. Rodney and R. J. Spindler, *J. Opt. Soc. Am.*, 44, 667 (1954).