

TeO_x(x=1.42)/SiO₂로 구성된 광가변적인 1차원 광자결정 연구

공 현¹, 여종빈², 이현용^{2,a}

¹ 전남대학교 신화학소재공학과

² 전남대학교 응용화학공학과

A Study on the Photo Reversible One-dimensional Photonic Crystals Composed of TeO_x(x=1.42)/SiO₂

Heon Kong¹, Jong-Bin Yeo², and Hyun-Yong Lee^{2,a}

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

² School of Applied Chemical Engineering, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

(Received November 10, 2014; Revised December 30, 2014; Accepted January 6, 2015)

Abstract: One-dimensional photonic crystals (1D PCs) were fabricated by RF sputtering technique on p-Si (100), and fused quartz substrates. The 1D PCs structures consisted of TeO_x (x=1.42), and SiO₂ with the difference refractive index. In order to estimate the effect on a defect level within 1D PCs structures, samples were prepared with both normal, and defect mode. The structural and optical properties were confirmed by Scanning electron microscope (SEM), and Ultraviolet visible near-infrared spectrophotometer (UV-VIS-NIR) respectively. In the case of a 1D PC normal mode without defect layer, it had a photonic band gap (PBG) in the near infrared (NIR) region. In the case of a 1D PC defect mode with defect layer, it had a sharp transmission band owing to a defect level, and moved towards the longer wavelength after exposing He-Cd laser with a wavelength of 325 nm.

Keywords: 1D PCs, PBG, Defect, TeO_x, Sputtering

1. 서론

광자결정은 서로 다른 굴절률을 갖는 광학매질이 주기성을 가지고 배열되어 있는 인공결정 구조를 일컬으며, 광을 제어할 수 있는 광자결정 (photonic crystals, PCs) 원리를 이용한 연구가 많은 관심을 받고 있다 [1-3]. 이러한 광자결정 구조체를 활용하여 광통신용 소자뿐만 아니라 광집적회로 및 가스센서 등 다양한 분야로의 응용범위가 확대되고 있다 [4-7].

광자결정의 주기 배열을 광의 파장 크기 수준으로 인공결정 구조를 만들면, 특정 주파수의 광을 선택적으로 완전 반사하는 특성을 갖는 광밴드갭 (photonic band gap, PBG)이 형성된다 [8,9].

광자결정 구조내의 결함 (defect)을 생성하면, 광자결정 구조는 그 결함으로 인하여 주기성을 잃게 되면서 광밴드갭에 영향을 받게 된다. 다시 말하면 광밴드갭 내에서 통과하지 못하던 광이 결함 준위로 인하여 특정 주파수에서 통과할 수 있게 된다 [10]. 이처럼 광자결정 구조 내에 결함모드를 만들어 주면 광밴드갭 내에 공진 (혹은 투과) 영역이 형성되므로 다양한 광전자소자의 응용이 가능해진다. 특히, 단일 결함모드를 갖는 광자결정은 레이저, LEDs (light-emitting diodes), 필터 등으로의 응용성을 갖는다 [11-13].

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

이번 1차원 광자결정 구조 제작에 사용되어지는 물질 중 텔루륨 산화물 (TeO_x)은 x 값의 변화에 따라 다양한 광학적 특성을 보인다 [14,15]. 스퍼터링 기법으로 제작된 TeO_x 특성에 관한 연구는 스퍼터링 가스 조성비를 변경함으로써 다양한 범위의 박막으로 연구가 이루어지고 있다. 연구 결과에 따르면 x 값이 증가할수록 굴절률이 감소하고, E_{op} 이 증가하는 경향을 보였다 [15].

본 연구의 목적은 $1 < x < 2$ 범위를 갖는 TeO_x ($x=1.42$)와 SiO_2 박막을 이용하여 1차원 광자결정 구조 제작 및 광학 특성 평가에 있다. 본 연구에서 적용된 TeO_x ($x=1.42$) 박막은 본 연구그룹에서 선행 연구한 결과인 스퍼터링 가스조성비에 따른 TeO_x 스퍼터링 박막 제작 공정을 바탕으로 제작하였다. 또한 결합층 유무에 따른 광밴드갭 결과를 고찰하기 위하여 정상모드 (normal mode)와 결함모드 (defect mode)에 대한 1차원 광자결정 구조체를 제작하였다. 특히 결함모드를 갖는 1차원 광자결정 구조체는 광노출을 통한 광가변 특성 또한 고찰하였다.

2. 실험 방법

2.1 $\text{TeO}_x(x=1.42)$, SiO_2 물질 특성

본 연구는 SiO_2 와 $x=1.42$ 에 대응하는 TeO_x 박막으로 1차원 광자결정 구조체를 구성하였다. 4 N의 순도를 갖는 TeO_2 와 SiO_2 타겟을 활용하여 RF 스퍼터링 기법으로 비정질의 박막을 제작하였다. SiO_2 와 TeO_x 박막은 스퍼터링 파워를 각각 150 W와 50 W에서 스퍼터링 가스 아르곤 (Ar)의 총 유량을 50 sccm으로 일정하게 흘려주면서 RF 마그네트론 스퍼터링 기법으로 성막하였다. 특히 TeO_x 박막은 스퍼터링 가스조성비 (Ar : O_2)에 따라 다양한 조성비를 갖으며, 서로 다른 광학적 특성을 보인다. 1차원 광자결정 구조체에 적용된 TeO_x 박막은 위와 같은 스퍼터링 파라미터를 적용함으로써 $1 < x < 2$ 범위의 조성을 갖는 TeO_x ($x=1.42$) 박막을 얻을 수 있었다. p-Si (100) 기판 위에 성막된 TeO_x ($x=1.42$) 박막의 조성 및 광학 특성은 XPS와 Ellipsometer 분석을 통하여 확인하였다. XPS 측정을 통하여 O 1s, Te 3d_{5/2} 피크가 확인되었고, O 1s에 대응되는 결합에너지 (binding energy)는 530.45 eV, Te 3d_{5/2} 대응하는 결합에너지는 576.2 eV, 573.2 eV로 확인되었다 [그림 1]. Te 3d_{5/2} 대응하는 결합에너지 중 576.2 eV는 Te-O 결합, 573.2 eV는 Te-Te 결합에

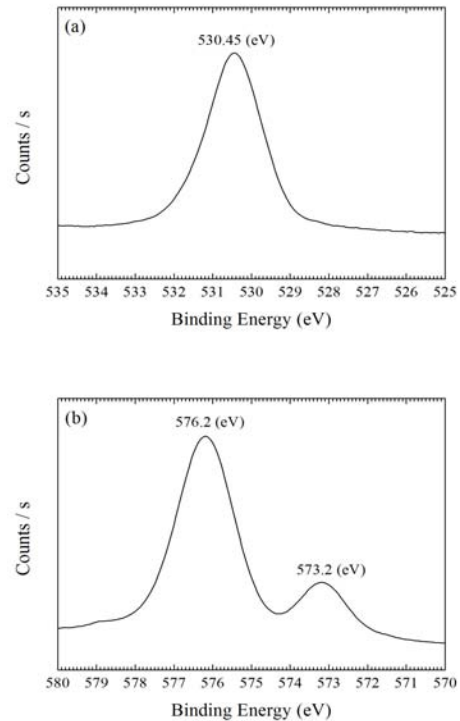


Fig. 1. XPS spectra of (a) O 1s and (b) Te 3d_{5/2} for TeO_x ($x=1.42$) thin film.

대한 결과를 나타내며, Te-O 결합과 Te-Te 결합이 공존함을 의미한다 [16]. XPS 분석에서 O 1s, Te 3d_{5/2} 피크들은 가우시안 분포를 가지는 그래프로 표현되며, 피크 면적을 이용하여 계산된 조성성분 원소비는 TeO_x ($x=1.42$)로 확인되었다 [15]. 또한 Ellipsometer 분석은 TeO_x ($x=1.42$) 및 SiO_2 박막의 굴절률 (refraction index, n)이 각각 2.608, 1.43임을 밝혔다 (633 nm 기준).

2.2 $\text{TeO}_x(x=1.42)/\text{SiO}_2$ 1차원 광자결정 제작

1차원 광자결정 구조체는 TeO_x ($x=1.42$) 박막과 SiO_2 박막을 교번하여 정상모드와 단일 결함층을 갖는 결함모드 2가지 모드로 제작하였다. 기판은 fused quartz와 p-Si (100)을 사용하였으며 표면의 오염을 제거를 위해 아세톤, 트리클로로에틸렌, 이소프로필알코올, 초순수 순으로 초음파세척기에서 세척한 후, RF 마그네트론 스퍼터링을 실시하였다. 1차원 광자결정을 이루는 TeO_x ($x=1.42$)와 SiO_2 박막의 균일도를 고려하여 기판 회전 및 프리 스퍼터링을 하였다.

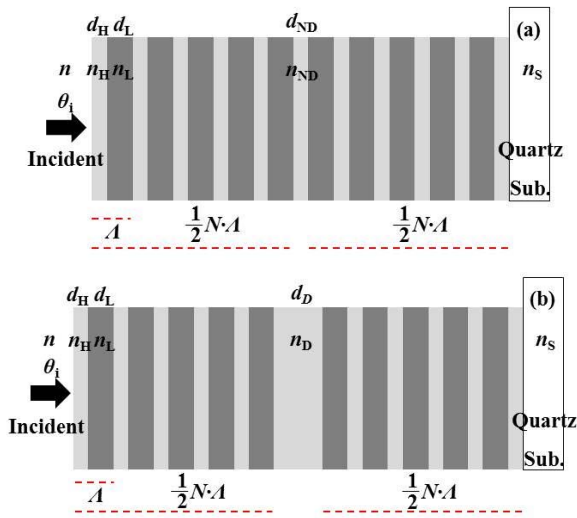


Fig. 2. Schematic diagrams of 1D PCs (a) normal mode and (b) defect mode.

그림 2는 서로 다른 굴절률을 가지는 물질 ($n_{\text{TeO}_x(x=1.42)} = 2.608$, $n_{\text{SiO}_2} = 1.43$)인 TeO_x ($x=1.42$)와 SiO_2 로 구성된 1차원 광자결정 구조체들의 개략도이다. 우선 그림 2(a)는 결함층이 삽입되지 않은 정상모드에 대한 구조이다. 1차원 광자결정 구조체는 TeO_x ($x=1.42$)와 SiO_2 로 이루어진 한쌍의 주기 ($\Lambda = d_H + d_L$)를 기본으로 한다. N 은 반복되어지는 주기의 쌍수를 의미하며 TeO_x ($x=1.42$)/ SiO_2 1차원 광자결정 구조체는 $N=10$ 으로 제작되었다. 고굴절률을 갖는 $\text{TeO}_x(x=1.42)$ 박막의 두께를 의미하는 d_H 는 150 nm, 저굴절률을 갖는 SiO_2 박막의 두께를 의미하는 d_L 은 250 nm로 제작하였다. d_H 와 d_L 의 두께를 바탕으로 주기(Λ)는 400 nm로 구성되고, d_H/d_L 로 계산되는 η (충진율)은 0.6 값을 갖는 구조로 제작되었다. 또한 정상모드 정중앙에 위치하는 박막, 즉, 결함모드의 결함층(d_D) 위치에 상당하는 박막은 결함모드의 결함층과 동일한 물질인 TeO_x ($x=1.42$)로 구성하였으며, d_{ND} 로 표기하였다. d_{ND} 두께는 d_H 두께와 같은 150 nm로 하였다.

이처럼 정상모드와 결함모드를 제작함으로써 결함층 유무에 따른 광학 특성 비교평가를 하였다. 결함층이 삽입된 결함모드의 1차원 광자결정 구조체는 그림 2 (b)에 나타내었으며, 결함층 TeO_x ($x=1.42$) 두께인 d_D 는 300 nm를 갖도록 제작하였다. 위에서 언급한 TeO_x ($x=1.42$)/ SiO_2 로 구성된 1차원 광자결정 구조체의 제작 파라미터들은 표 1에 나타내었다.

Table 1. Structure parameters of 1D PCs.

Structure parameters	Material	Value
n_H	$\text{TeO}_x(x=1.42)$	2.608
n_L	SiO_2	1.43
n_D	$\text{TeO}_x(x=1.42)$	2.608
n	air	1
n_S	Fused quartz	1.457 [17]
d_H	$\text{TeO}_x(x=1.42)$	150
d_L	SiO_2	250
d_D	$\text{TeO}_x(x=1.42)$	300
d_{ND}	$\text{TeO}_x(x=1.42)$	150
Λ	-	400
η	-	0.6
Θ_i	-	0°
N	-	10

2.3 $\text{TeO}_x(x=1.42)/\text{SiO}_2$ 1차원 광자결정 특성평가

1차원 광자결정 구조체에 대한 광학적 특성평가를 위하여 UV-VIS-NIR (ultraviolet visible near-infrared spectrophotometer, Varian, Cary 500, U.S.A.)을 활용하여 200~2,000 nm 파장 범위에서 투과도를 측정하였다. 1차원 광자결정 구조체의 투과도는 비-편광 상태에서 θ_i (입사각) 0° 인 상태에서 측정되었다. 이를 통하여 정상모드와 결함모드를 갖는 1차원 광자결정 구조체 각각에 대한 광밴드갭 (PBG) 특성을 평가하였다. 또한 결함모드를 갖는 1차원 광자결정 구조체는 He-Cd ($\lambda = 325$ nm) 레이저 노출을 실시한 후 결함준위에 대한 투과도 피크 변화를 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 3은 p-Si (100) 기판 위에 제작된 10-pair로 제작된 TeO_x ($x=1.42$)/ SiO_2 1차원 광자결정 구조체에 대한 SEM 이미지를 나타낸다. SEM 측정을 통한 이미지 확인 시, 그림 2와 표 1에서 제시된 제작 파라미터와 일치하는 샘플이 제작되었음을 확인하였다.

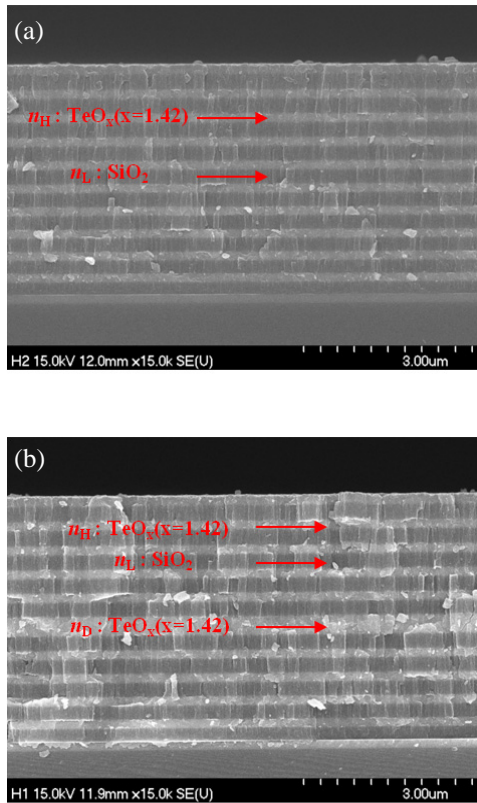


Fig. 3. SEM images of 1D PCs (a) normal mode and (b) defect mode composed of TeO_x ($x=1.42$), and SiO_2 .

그림 3(a)는 정상모드의 이미지로 $N=10$, $\Lambda=400$ nm, $d_{\text{ND}}=150$ nm의 제작 파라미터 값을 갖으며, 광경로는 $\text{air} \rightarrow 1/2 \cdot N \cdot (d_{\text{H}} + d_{\text{L}}) \rightarrow d_{\text{ND}} \rightarrow 1/2 \cdot N \cdot (d_{\text{H}} + d_{\text{L}}) \rightarrow \text{fused quartz}$ 로 진행한다. 그림 3(b)는 결함층이 삽입된 결함모드의 이미지이며 $N=10$, $\Lambda=400$ nm, $d_{\text{b}}=300$ nm의 제작 파라미터 값으로 제작되었다. 특히 d_{b} 두께는 d_{H} 두께의 2배인 값을 갖는 두께를 삽입하였다. 결함모드의 광경로 진행 방향은 $\text{air} \rightarrow 1/2 \cdot N \cdot (d_{\text{H}} + d_{\text{L}}) \rightarrow d_{\text{b}} \rightarrow 1/2 \cdot N \cdot (d_{\text{H}} + d_{\text{L}}) \rightarrow \text{fused quartz}$ 순이다.

TeO_x ($x=1.42$) 박막과 SiO_2 박막으로 구성된 1차원 광자결정 구조체는 그림 2에서 보는 바와 같이 비편광모드의 θ_i (입사각) = 0° 에서 UV-VIS-NIR를 활용하여 투과도를 측정하였고, 그림 4는 실측된 투과도 그래프이다. 또한 투과도 측정을 통하여 얻어진 광밴드갭 (PBG) 및 첨예한 투과 피크는 1차원 광자결정 구조체 모드별로 표 2에 간략하게 정리하였다.

Table 2. The transmittance results measured by UV-VIS-NIR.

1D PC mode	Transmittance results	
	PBG (nm)	Transmission peak (nm)
Normal	1,225 ~ 1,680 ($\Delta\lambda = 455$)	-
Defect	1,162 ~ 1,748 ($\Delta\lambda = 586$)	1,458

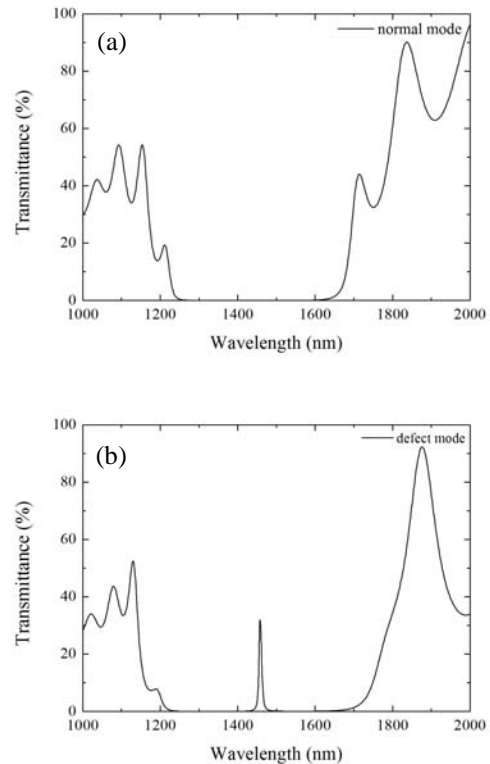


Fig. 4. The measured transmittance spectra of 1D PCs (a) normal mode, and (b) defect mode composed of TeO_x ($x=1.42$), and SiO_2 .

그림 4(a)는 10-pair TeO_x ($x=1.42$)/ SiO_2 로 제작된 정상모드에 대한 투과도이다. 측정된 투과도 결과 중에서 10% 미만의 값을 갖는 구간을 광밴드갭 (PBG)이라고 정의할 경우, 정상모드의 광밴드갭은 1,225 ~ 1,680 nm 파장 내에서 형성되며 $\Delta\lambda = 455$ nm 값을 갖는 것을 확인하였다. 결함층이 삽입된 10-pair TeO_x ($x=1.42$)/ SiO_2 로 제작된 결함모드의 투과도는 그림 4(b)에 나타내었다. 결함모드에서 나타나는 광밴드갭 형성 구간은 1,162 ~ 1,748 nm 이었으며, 결함층 삽입에 따른 첨예한 투과 피크가 1,458 nm 파장에서 나타났다.

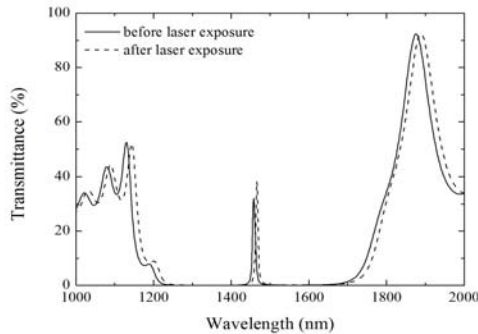


Fig. 5. The measured transmittance spectra of 1D PCs defect mode composed of TeO_x ($x=1.42$), and SiO_2 after exposing He-Cd laser with a wavelength of 325 nm.

그림 5는 결함층이 삽입된 결함모드 샘플에 대하여 광조사 장치를 활용한 광조사 실험 전후의 투과도를 나타낸 그래프이다. 광조사 실험에 사용된 장치는 광원 (He-Cd laser, $\lambda=325$ nm), ND필터 (neutral density filter), 셔터 (shutter), 미러 (mirror), 대물렌즈 (object lens), 핀홀 (pinhole), 조준렌즈 (collimating lens)로 구성이 된다. 1차원 광자결정 결함모드 샘플은 광조사 장치를 거치면서 균일한 광원이 조사되게 하였으며, 360분 동안 진행하였다. 그림 5에서 보는 바와 같이 광조사 전 (실선) 첨예한 투과 피크는 $\lambda=1,458$ nm에서 광조사 후 (점선) $\lambda=1,466$ nm으로 장파장 쪽으로 이동됨을 확인하였다. 광에 의하여 광밴드갭 및 광밴드갭 내의 첨예한 투과 피크의 파장 변화는 가변적인 필터로의 응용을 가능하게 하리라 생각된다.

현재 본 연구진은 TMM-MathCAD을 활용하여 이번 연구에서 제작된 1차원 광자 결정에 대한 시뮬레이션을 통하여 실측된 결과값과 비교 연구를 수행 중이다. 또한 325 nm 파장 He-Cd laser 광원 이외의 다른 파장대의 광원을 활용하여 광조사에 따른 광학평가도 진행 중에 있다.

4. 결론

본 연구에서는 서로 다른 굴절률을 갖는 TeO_x ($x=1.42$)와 SiO_2 물질을 교번함으로써 10-pair의 1차원 광자결정을 제작하였다. 특히 1차원 광자결정 구조체 내의 결함층에 대한 영향을 확인하기 위하여 2가지 모드, 즉, 정상모드와 단일 결함층이 삽입된 결함모드

를 제작 및 비교 평가하였다. 제작된 정상모드에서는 광밴드갭 (PBG)의 파장 범위가 $\Delta\lambda=455$ nm 확인되었고, 결함모드에서는 광밴드갭 (PBG) 내에 결함 준위에 따른 첨예한 투과 피크가 나타났다. 또한 He-Cd laser ($\lambda=325$ nm)를 이용한 광조사 평가에서는 첨예한 투과 피크는 장파장으로의 이동이 확인되었다.

감사의 글

본 연구는 2012년도 정부 (교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원 (No.2012R1A6A304037897, 2012K1A1A4A01015683)으로 수행된 연구임.

REFERENCES

- [1] S. John, *Phys. Rev. Lett.*, **58**, 2486 (1987).
- [2] E. Yablomovitch, *Phys. Rev. Lett.*, **58**, 2059 (1987).
- [3] E. Yablonovitch, *J. Opt. Soc. Am. B*, **10**, 283 (1993).
- [4] A. K. Goyal, and S. Pal, *Optik.*, **126**, 240 (2015)
- [5] H. Xu, P. Wu, C. Zhu, A. Elbaz, and Z. Z. Gu, *J. Mater. Chem. C*, **1**, 6087 (2013).
- [6] Y. N. Zhang, Y. Zhao, D. Wu, and Q. Wang, *Sens. Actuators, B*, **173**, 505 (2012).
- [7] N. Hidalgo, M. E. Calvo, S. Colodrero, and H. Míguez, *IEEE Sensor J.*, **10**, 1206 (2010).
- [8] E. Yablonovitch, *J. Phys.: Condens. Matter.*, **5**, 2443 (1993).
- [9] E. Yablonovitch, *J. Mod. Opt.*, **41**, 173 (1994).
- [10] J. D. Joannopoulos, P. Villeneuve, and S. Fan, *Nature*, **386**, 143 (1997).
- [11] W. D. Zhou, J. Sabarinathan, P. Bhattacharya, B. Kochman, E. W. Berg, P. C. Yu, and S. W. Pang, *IEEE J. Quantum Electron.*, **37**, 1153 (2001).
- [12] M. W. Feise, I. V. Shadrivov, Y. S. Kivshar. *Phys. Rev. E*, **71**, 037602 (2005).
- [13] H. Y. Lee, H. Makino, T. Yao, and A. Tanaka, *Appl. Phys. Lett.*, **81**, 4502 (2002).
- [14] M. F. Al-Kuhaili, S. M. A. Durrani, E. E. Khawaja, and J. Shirokoff, *J. Phys. D*, **35**, 910 (2002).
- [15] N. Dewan, V. Gupta, K. Sreenivas, and R. S. Katiuar, *J. Appl. Phys.*, **101**, 084910 (2007).
- [16] L. I. Qinghui, G. U. Donghong, and G. A. N. Fuxi, *J. Mater. Sci. Technol.*, **20**, 678 (2004).
- [17] W. S. Rodney, and R. J. Spindler, *J. Opt. Soc. Am.*, **44**, 667 (1954).