

# 비정질 텔루륨 산화물 박막 특성에 미치는 O<sub>2</sub>/Ar 가스비율의 영향

공 헌<sup>1</sup>, 정건홍<sup>1</sup>, 여종빈<sup>2</sup>, 이현용<sup>1,2,a</sup>

<sup>1</sup> 전남대학교 신화학소재공학과

<sup>2</sup> 전남대학교 촉매연구소

## Effect of O<sub>2</sub>/Ar Gas Ratios on the Characteristics of Amorphous Tellurium Oxide Thin Films

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

<sup>1</sup> Department of Advanced Chemicals and Engineering, Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea

<sup>2</sup> Research Institute of Catalysis, Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea

(Received January 6, 2017; Revised March 8, 2017; Accepted March 8, 2017)

**Abstract:** TeO<sub>x</sub> thin films were deposited at various O<sub>2</sub>/Ar gas-flow ratios by a reactive RFmagneton sputtering technique from TeO<sub>2</sub> and Te targets. X-ray diffraction (XRD) results revealed that the TeO<sub>x</sub> thin films were amorphous. The structure and chemical composition of the TeO<sub>x</sub> thin films were investigated by fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). The optical characteristics of the TeO<sub>x</sub> thin films were investigated by an Ellipsometer and a UV-VIS-NIR spectrophotometer. According to the O<sub>2</sub>/Ar gas-flow ratios, the atomic composition ratio of TeO<sub>x</sub> thin films was divided into two regions( $x=1-2$ ,  $2-3$ ). Different optical characteristics were shown in each region. With an increasing O<sub>2</sub>/Ar gas-flow ratio, the refractive index of the TeO<sub>x</sub> thin films decreased and the optical bandgap of the films increased.

**Keywords:** Tellurium oxide, Thin films, Sputtering, Gas flow ratio, Refractive index, Optical bandgap

### 1. 서론

텔루륨 산화물(TeO<sub>x</sub>)은 높은 음향광학 성능지수, 유전상수 및 기계적 내구성, 화학적 안정성 등의 우수한 특성들을 보인다 [1-6]. 이러한 특성들은 텔루륨 산화물을 이용한 광학소자,  $\gamma$ -ray 디텍터, 가스 센서 등에 응용을 가능하게 한다 [7-10]. 또한 TeO<sub>2</sub> 기반 유리는 SiO<sub>2</sub> 기반 유리에 비해 100배 정도의 높은 비선형 굴절률로 인하여 비선형 광학기기 기술에 잠재적인 응용을

가능하게 한다 [5].

TeO<sub>x</sub> 박막은 스퍼터링, 열증착, 졸겔 등 다양한 방법으로 제작되고 있다 [11-13]. 대부분의 TeO<sub>x</sub> 박막 연구는 특정 조성인 TeO<sub>2</sub> 박막에 대한 제작 및 특성 평가가 주로 수행되고 있다 [11,14]. 하지만 산화물계 박막의 광학적 특성은 화학조성비나 미세구조에 따라 상이하게 나타날 수 있다. TeO<sub>x</sub> 박막 역시 화학조성에 따른 상이한 광학 특성이 보고되고 있는바 다양한 화학조성비를 갖는 박막을 제작하여 특성 평가에 대한 연구가 중요하다고 할 수 있다 [6,7].

위에서 언급한 TeO<sub>x</sub> 제작 기법 중에서, 스퍼터링 기법을 활용한 박막의 특성 및 응용 연구는 텔루륨(Te) 타겟을 활용한 리액티브 스퍼터링 기법이 주를 이루고 있다. 하지만 TeO<sub>2</sub> 타겟으로 제작된 박막을 바탕으로 하

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

는 텔루륨 산화물 특성 연구와 타겟 종류에 따른 특성 비교 연구는 거의 수행되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 Te 타겟과 TeO<sub>2</sub> 타겟을 활용하여 스퍼터링 기법으로 텔루륨 산화물 박막을 제작하였다. 성막된 다양한 박막에 대하여 스퍼터 타겟별, 스퍼터 가스조성별로 각각 특성을 고찰하였다. 특히 제작된 박막의 화학조성비 범위를  $1 < x < 2$ 와  $2 < x < 3$ 로 나누어 광학 특성을 비교하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 텔루륨 산화물 박막의 제작

본 연구에 사용된 텔루륨 산화물 박막은 4N(순도 99.99%)의 Te 타겟과 TeO<sub>2</sub> 타겟을 사용하여 반응성 RF 마그네트론 스퍼터링 기법으로 제작하였다. 텔루륨 산화물 박막은 세가지 기판을 선정하여 사용하였다. 구조, 조성 평가를 위해서 10×10 mm 크기의 p-type (100) Si 기판과, 광학 평가를 위한 20×20 mm 크기의 fused quartz 기판을 준비하였다. 또한 15 mm 지름의 KBr pellet을 제작하여 IR 스펙트럼 분석용 기판으로 사용하였다. p-type (100) Si와 fused quartz 기판의 경우, 기판 표면의 오염을 제거하기 위하여 아세톤, 트리클로로에틸렌, 이소프로필알코올, 탈이온화수 순으로 초음파세척기에서 각각 10분씩 전처리를 실시하였다. 전처리가 완료된 기판위에 다양한 조성비를 갖는 텔루륨 산화물 박막 제작을 위하여 스퍼터링 가스 조성비(O<sub>2</sub>/Ar)를 타겟별로 3가지 조건으로 제작하였다. 박막 제작을 위한 스퍼터 파워는 50 W로 고정하여 제작하였으며, 스퍼터 공정압력은 base pressure 10<sup>-6</sup> Torr, deposition pressure 10<sup>-3</sup> Torr로 하여 성막하였다. 또한 스퍼터링 가스 조성비는 총유량 50 sccm 으로 고정한 상태에서 Ar과 O<sub>2</sub>의 혼합비를 변경하여 진행하였다. TeO<sub>2</sub> 타겟을 이용한 스퍼터링 성막은 O<sub>2</sub>/Ar 가스조성비=0, 0.25, 1로 실험하였고, Te 타겟을 이용한 스퍼터링은 O<sub>2</sub>/Ar 가스조성비=0.11, 0.43, 1로 실험하였다. 본 실험의 반응성 RF 마그네트론 스퍼터링 파라미터들은 표 1에 간략하게 나타내었다. 다양한 스퍼터링 공정조건들에 의해 제작된 샘플들은 아래와 같이 명명하여 연구결과를 고찰하였다. TeO<sub>2</sub> 타겟 및 O<sub>2</sub>/Ar 가스조성비=0, 0.25, 1 샘플조건은 이후 각각 C0, C0.25, C1으로 명기

**Table 1.** Reactive RF magnetron sputtering parameters.

Target	Sputtering parameters	Condition
TeO <sub>2</sub>	Power (W)	50
	Base pressure (Torr)	10 <sup>-6</sup>
	Deposition pressure (Torr)	10 <sup>-3</sup>
	O <sub>2</sub> /Ar gas ratio	0 (C0)
		0.25 (C0.25)
		1 (C1)
	Substrate temperature (°C)	RT
Te	Power (W)	50
	Base pressure (Torr)	10 <sup>-6</sup>
	Deposition pressure (Torr)	10 <sup>-3</sup>
	O <sub>2</sub> /Ar gas ratio	0.11 (M0.11)
		0.43 (M0.43)
		1 (M1)
	Substrate temperature (°C)	RT

하였고, Te 타겟 및 O<sub>2</sub>/Ar 가스조성비=0.11, 0.43, 1 샘플조건은 M0.11, M0.43, M1으로 표기하였다.

### 2.2 텔루륨 산화물 박막의 특성 분석

타겟 및 스퍼터링 가스조성비에 따라 성막된 텔루륨 산화물 박막은 구조, 조성, 광학 특성 분석을 위하여 다음과 같은 측정을 실시하였다.

구조 특성을 평가는 p-type (100) Si 기판위에 성막된 as-deposited 상태의 텔루륨 산화물 박막들에 대하여 FE-SEM (field emission scanning electron microscope, Hitachi S-4700, Japan)을 활용하여 각각의 조건별로 증착률을 확인하였다. 박막들의 비정질 및 결정화 정도는 XRD (X-ray diffractometer, PANalytical, X'Pert Pro Multi Purpose, Netherlands)을 활용하여 20~80° 범위에서 2θ scan으로 측정하였다.

총 여섯 조건으로 성막된 텔루륨 산화물 박막의 조성을 평가하기 위하여 p-type (100) Si와 KBr pellet 기판에 준비된 샘플로 XPS (X-ray Photoelectron Spectroscopy, SSK, Multilab 2000 system, U.S.A.)와 FT-IR (Fourier transform Infrared Spectrometer, PerkinElmer, Spectrum 400, U.K.)를 활용하여 binding energy 및 Te-O bond에 대한 분석을 실시하였다.

광학적 특성 평가는 fused quartz 기판위에 성막된 텔루륨 산화물 박막을 대상으로 UV-VIS-NIR (Ultraviolet

visible near-infrared spectrophotometer, Varian, Cary 500, U.S.A.)을 활용하여 광투과율을 측정하였고, 이를 기반으로 optical energy bandgap ( $E_{op}$ )를 계산하였다. 또한 굴절률 측정은 Ellipsometer (Ellipsometer, Jobin Yvon Sas, Uvisel/M200VISMGMS, France)를 활용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

P-type Si (100) 기판 위에 성막된 박막들은 주사전 자현미경을 활용하여 타겟 및 스퍼터링 가스조성비별로 증착률을 확인하였다. 측정된 박막들의 증착률은 타겟과 스퍼터링 가스 조성비에 따라 상이한 결과를 보였다.  $\text{TeO}_2$  타겟의 증착률은 C0, C0.25, C1에 대하여 각각 12, 10, 9 nm/min이었고, Te 타겟의 경우는 M0.11, M0.43, M1에 대하여 36, 24, 14 nm/min의 증착률을 보였다. 이를 통하여 스퍼터링 가스조성비 중 산소 비율이 증가할수록 박막의 증착률이 낮아짐을 확인하였고,  $\text{TeO}_2$  타겟은 Te 타겟보다 증착률이 감소함을 확인하였다. 이는 타겟 표면의 화학물 형성 정도와 반응성 가스인  $\text{O}_2$ 로 인한 스퍼터링을 감소에 기인한다.

그림 1은 스퍼터링 가스 조성비에 따른 fused quartz 기판 위에 성막된 as-grown 상태의 박막 표면 이미지를 나타낸다. 그림 1 상단의 이미지는  $\text{TeO}_2$  타겟으로 성막된 텔루륨 산화물 박막이며, 그림 2 하단의 이미지는 Te 타겟으로 제작된 박막이다. 스퍼터링 가스 조성비의  $\text{O}_2$  함량이 증가함에 따라 박막의 외관은 진갈색, 연초록색, 연핑크색과 같이 특유의 빛깔을 보였다. 이처럼  $\text{TeO}_x$  박막이 다양한 색깔을 띠는 이유는 스퍼터링 가스 조성비 중에서 산소 함량의 증가에 따라 화학량론의 변화에 기인한다 [5]. 스퍼터링 가스조성비 중  $\text{O}_2$  함량이 적은 C0, M0.11의 경우 가시광 영역에서 불투명함을 확인할 수 있었다. 또한  $\text{O}_2$  함량이 20% 이상인 C0.25, C1, M0.43, M1인 샘플들은 가시광 영역에서 투과가 가능한 박막이 성막됨을 확인하였다. 이는  $\text{TeO}_x$  박막의 화학량론적 조성비에 따라 상이한 광학적 특성을 보이는 것으로 보인다.

그림 2는  $\text{TeO}_2$  및 Te 타겟으로 제작된  $\text{TeO}_x$  박막의 XRD 측정 결과이다. 타겟 및 가스 조성별로 as-deposited 상태에서 측정되었으며, 모든 조건의 박막은 비정질 상태(amorphous state)를 보였다.



Fig. 1. Images of physical appearance of  $\text{TeO}_x$  thin films fabricated by using  $\text{TeO}_2$  and Te targets.

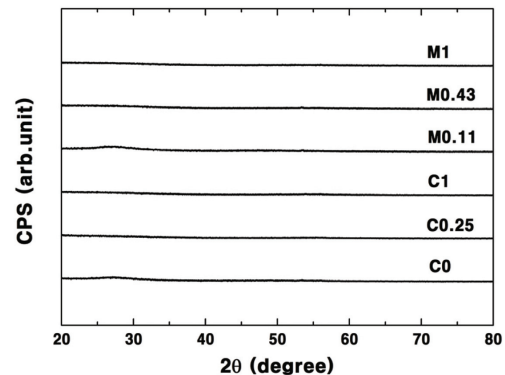


Fig. 2. XRD patterns of  $\text{TeO}_x$  thin films fabricated by using  $\text{TeO}_2$  and Te targets.

스퍼터링 가스조성비에 따른  $\text{TeO}_x$  박막의 조성 분석은 XPS와 IR spectrum 분석을 통하여 확인하였다. XPS 분석을 통하여  $\text{TeO}_x$  박막의 결합에너지와 성분 원소비를 확인하였고, O 1s와 Te  $3d_{5/2}$  피크를 기준으로 분석하였다. IR spectrum 분석을 통하여 흡수 피크를 확인하여 타겟 및 스퍼터링 가스조성비별 경향성을 파악하였다.

그림 3은  $\text{TeO}_2$ 와 Te 타겟으로 제작된  $\text{TeO}_x$  박막의 결합에너지를 보여주는 XPS 결과이다. 기존  $\text{TeO}_x$ ( $x \leq 1.1$ ) 박막에 대한 XPS 연구 결과를 살펴보면, Te  $3d_{5/2}$  피크가 대략 573 eV와 576 eV에서 동시에 나타났다. 이 결과에 대응하는 573 eV와 576 eV 피크는 각각 Te 금속( $\text{Te}^0$ )과  $\text{TeO}_2$  내의 Te 이온( $\text{Te}^{4+}$ )에 의한 것이다 [7,15].

그림 3(a)는  $\text{TeO}_2$  타겟으로 제작된 박막의 O 1s와 Te 3d 피크를 나타낸다. C0의 경우, O 1s는 530.45 eV에서 피크가 확인되었고, Te  $3d_{5/2}$ 는 576.2 eV와 573.2

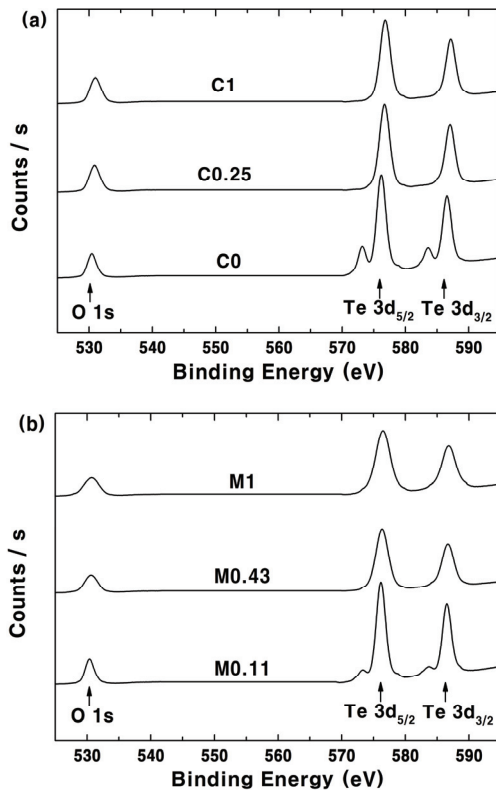


Fig. 3. XPS spectra of O 1s and Te 3d region for  $\text{TeO}_x$  thin films fabricated by using (a)  $\text{TeO}_2$  and (b) Te targets.

eV에서 피크가 확인되었다. 576.2 eV에 나타나는 피크는  $\text{TeO}_2$  내의 Te 이온( $\text{Te}^{4+}$ )에 대한 결합에너지이고, 573.2 eV에 나타나는 피크는 Te 금속( $\text{Te}^0$ )에 대한 결합 에너지를 나타낸다. 이는 C0에 대한  $\text{TeO}_x$  박막에서는 Te 금속과  $\text{TeO}_2$ 가 공존함을 의미한다. 반면 C0.25, C1의 경우, O 1s에 대응하는 피크는 각각 530.85 eV와 531 eV로 확인되었고, Te  $3d_{5/2}$ 에 대응하는 피크는 각각 576.7 eV와 576.8 eV에서 나타났다.  $\text{TeO}_2$  내의 Te 이온( $\text{Te}^{4+}$ )의 존재만 확인되면서, 대략 573 eV에서 Te 금속에 대응하는 피크는 나타나지 않았다.

그림 3(b)는 Te 타겟으로 제작된 박막의 O 1s와 Te 3d 피크를 나타낸다. M0.11의 경우, O 1s는 530.4 eV에서 피크가 나타났으며, Te  $3d_{5/2}$ 는 576.15 eV와 573.35 eV에서 두 개의 피크가 나타났다. 576.15 eV와 573.35 eV에 나타나는 피크는 각각  $\text{TeO}_2$  내의 Te 이온( $\text{Te}^{4+}$ )와 Te 금속( $\text{Te}^0$ )에 기인한다. M0.11의 샘플은 Te 금속과  $\text{TeO}_2$ 로 구성됨을 알 수 있다. 다음으로 M0.43, M1의 샘플에서는 O 1s에 대응하는 피크는 각각 530.65

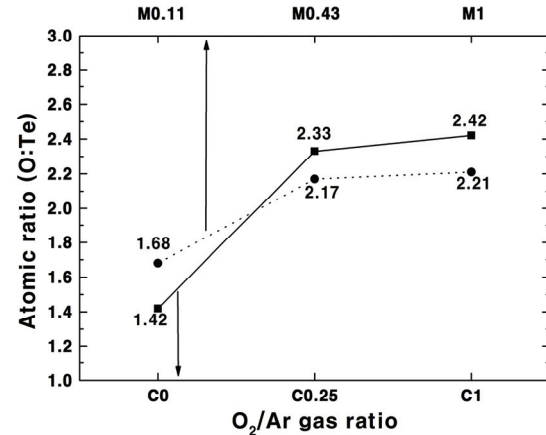


Fig. 4. Atomic ratio(O:Te) of  $\text{TeO}_x$  thin films fabricated by using  $\text{TeO}_2$  and Te targets.

eV와 530.7 eV 이었으며, Te  $3d_{5/2}$  피크는 각각 576.35 eV와 576.5 eV에 존재하였다. M0.43와 M1의 샘플은  $\text{TeO}_2$  내의 Te 이온( $\text{Te}^{4+}$ )에 대응하는 피크만 확인되었다. Te 타겟으로 제작된  $\text{TeO}_x$  박막은 스퍼터링 가스조성비 중 산소의 함량이 30% 이상의 조건에서 Te 금속에 대응하는 피크가 존재하지 않았다.

XPS 분석을 통하여 얻어진 O 1s와 Te  $3d_{5/2}$  결합에너지 피크 면적을 활용하여,  $\text{TeO}_x$  박막들의 atomic ratio (O : Te)를 계산하였다 [6.12]. 계산되어진 atomic ratio (O : Te)는 그림 4에 나타났다.  $\text{TeO}_2$  타겟으로 제작된  $\text{TeO}_x$  박막 샘플인 C0, C0.25, C1의 atomic ratio는 각각 1.42, 2.33, 2.42로 확인되었다. Te 타겟으로 제작된  $\text{TeO}_x$  박막들인 M0.11, M0.43, M1의 atomic ratio는 각각 1.68, 2.17, 2.21 값을 가졌다. 스퍼터링 가스조성비 중 산소의 비중이 50% (C1, M1)로 동일한 경우,  $\text{TeO}_2$  타겟은 Te 타겟에 비하여 atomic ratio가 큰  $\text{TeO}_x$  박막 성막이 가능함을 확인하였다.

IR spectrum을 통하여 흡수 피크를 확인함으로써 Te-O bond에 대한 정보를 확인하였다. 그림 5는 KBr pellet 위에 성막된 샘플들의 IR 투과도에 대하여 흡수 피크를 정리한 결과이다. 스퍼터링 가스조성비에 따라  $\text{TeO}_2$  타겟에 의해 제작된 박막들은  $601\sim 663\text{ cm}^{-1}$ 에서 흡수 피크가 나타났고, Te 타겟에 의해 제작된 박막에서는  $605\sim 654\text{ cm}^{-1}$ 에서 흡수 피크가 나타났다. 스퍼터링 가스조성비 중에서 산소의 비중이 증가할수록 흡수 피크의 파수(wavenumber)가 증가함을 확인하였다. 기존에 연구된 as-grown  $\text{TeO}_2$  박막의 흡수 피크는

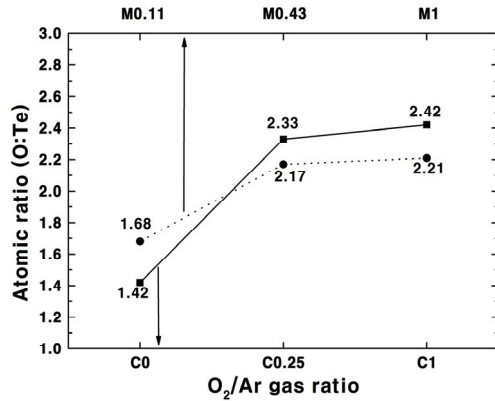


Fig. 5. IR spectrum of  $\text{TeO}_x$  thin films fabricated by using  $\text{TeO}_2$  and Te targets.

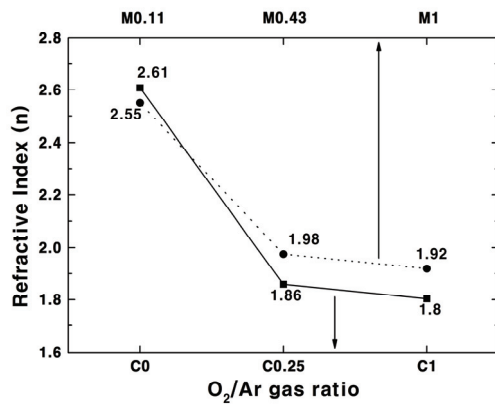


Fig. 6. Refractive index of as-deposited thin films fabricated by (a)  $\text{TeO}_2$  and (b) Te target.

$630\text{ cm}^{-1}$ 에서 나타난다고 보고되었다 [14]. 기존에 연구된  $\text{TeO}_2$  박막의 흡수 피크와 비교했을 때,  $637\text{ cm}^{-1}$ 에서 흡수 피크를 갖는 M0.43 조건의 박막이  $\text{TeO}_2$ 에 가장 근접함을 확인하였으며, 이는 XPS 분석 결과와 일치함을 보였다. 또한 기존에 연구된  $\text{TeO}_2$  박막의 흡수 피크를 기준으로 하였을 때, 본 연구를 통하여 얻어진  $\text{TeO}_x$  박막은 두 영역으로 나누어진다. 즉, XPS 분석에서 밝혔던 atomic ratio와 비교했을 때, C0과 M0.11은  $1 < x < 2$  범위 안에 위치하고, 그 외 조건 (C0.25, C1, M0.43, M1)들은  $2 < x < 3$  범위 안에 위치함을 알 수 있다.

그림 6은 p-Si (100) 기판위에 성막된 박막에 대하여  $\lambda=633\text{ nm}$ 에서의 굴절률 ( $n$ )을 나타냈다.  $1 < x < 2$  범위를 가지는 C0, M0.11의 굴절률은 각각 2.61, 2.55 값을

가졌다. 또한  $2 < x < 3$  범위내 C0.25, C1, M0.43, M1의 굴절률은 각각 1.86, 1.8, 1.98, 1.92로 확인되었다. 스퍼터링 가스조성비 내 산소의 비중이 늘어날수록  $\text{TeO}_x$  박막의 굴절률은 감소하는 경향을 나타내었다. 굴절률은 일반적으로 물질의 밀도와 밀접한 관련이 있으며, 스퍼터링 가스조성비 내 산소 함량이 증가하면서 화학량론 변화로 인한 밀도의 감소에 의한 것으로 보인다 [6]. 기존의 벌크  $\text{TeO}_2$ 로 연구된 결과 ( $n=2.2$ )와 비교하여 본 연구에서 진행된 박막의 굴절률은 낮은 결과값을 가졌다 [16]. 이는 벌크  $\text{TeO}_2$ 에 비해 낮은 굴절률을 갖는 이유는 성막 과정에서 발생하는 불순물과 공극 기인으로 박막의 밀도를 낮추는 영향이라고 할 수 있다 [5]. 또한 M. D. Giulio *et al.*에서는  $\text{TeO}_x$  ( $x=0.5\sim 2$ ) 박막 조성에 따른 투과도와 반사도 측정을 통하여 광학상수(refractive index  $n$ , extinction coefficient  $k$ )를 계산하여 평가하였다 [17].  $\text{TeO}_x$  박막의  $x$ 값이 증가할수록 광학상수  $n$ ,  $k$  값은  $n=4\sim 2$ ,  $k=1\sim 0$  범위 안에서 감소하는 경향을 보였으며, 본 연구의 결과는 기 보고된 문헌과 같은 경향을 보였다. 특히 기 보고된 연구결과의 경우,  $200^\circ\text{C}$ 에서 5분간 열처리한 결과에서는 광학상수가 증가하였으며,

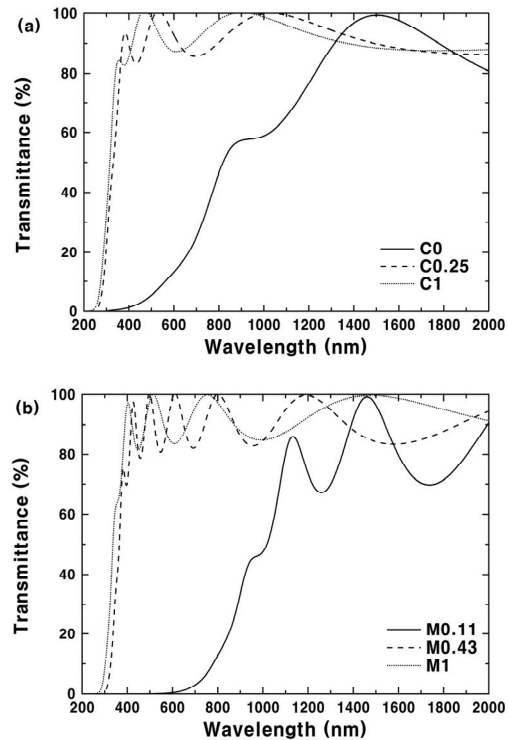


Fig. 7. Transmittance spectra of  $\text{TeO}_x$  thin films fabricated by using (a)  $\text{TeO}_2$  and (b) Te targets.

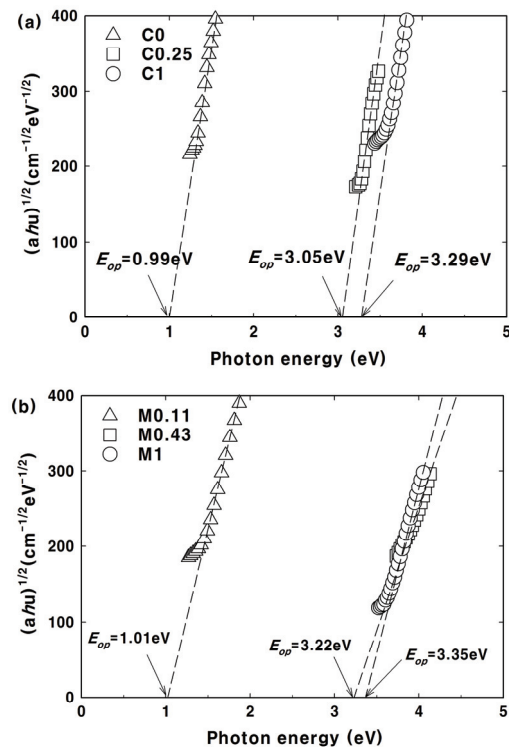


Fig. 8. Plots of  $h\nu$  vs  $(\alpha h\nu)^{1/2}$  of amorphous  $\text{TeO}_x$  thin films fabricated by using (a)  $\text{TeO}_2$  and (b) Te targets.

0.7 < x < 1.2 범위에서 높은 상대변화를 보였다.

그림 7은 fused quartz 기판위에서 스퍼터링 가스 조성비별로 성막된 박막의 투과도를 나타낸다. 1 < x < 2 범위를 갖는  $\text{TeO}_x$  박막인 C0, M0.11은 가시광 영역내의 550 nm 파장 기준으로 10% 미만의 낮은 투과율을 보였다. 2 < x < 3 범위 내의  $\text{TeO}_x$  박막인 C0.25, C1, M0.43, M1은 550 nm 파장 기준으로 가시광 영역에서 80%가 넘는 우수한 투과도를 보였다.

그림 8에 나타난  $E_{op}$ (Optical-energy band gap)는 UV-VIS-NIR spectrophotometer를 활용하여 투과도 ( $T$ )를 측정 후 그 값을 이용하여 계산하였다. 우선, Beer의 법칙인  $\alpha(\lambda) = -\ln(T_{op})/d$  관계식으로부터 광흡수 계수  $\alpha(\lambda)$ 를 산출하였다. 여기서  $d$ 는 박막의 두께를 의미한다. 대부분의 비정질 박막은  $E_{op}$  아래 부근  $h\nu < E_{op}$ 에서 Urbach tail이라 불리는 지수 함수적 밴드꼬리를 가진다. 이를 통해 Beer의 법칙을 이용해 구한  $\alpha(\lambda)$ 값을 이용하여 Tauc 방정식인  $\alpha h\nu \propto (h\nu - E_{op})^n$ 의 관계식을 적용시켜  $E_{op}$ 값을 도출하게 되는데 이 때  $n$ 은 직접 천이반도체의 경우  $n=1/2$ , 간접천이반도체의 경우는

$n=2$ 값을 가진다. 일반적으로, 비정질의  $\text{TeO}_x$  박막의 경우, 확장에너지 영역( $h\nu > E_{op}$ ) 영역에서  $\alpha h\nu \propto B(h\nu - E_{op})^2$ 으로 표현되는 흡수특성을 가진다 [18,19].

그림 8 (a), (b)에 표기된  $E_{op}$ 값은 각 조건에 대하여 비정질 박막  $h\nu$ 에 대한  $(\alpha h\nu)^{1/2}$ 의 그래프로 외삽을 통해 얻어지는 photon energy축의 절편값으로 산출하였다. 기존 Al-Ani et al.에서 연구된 비정질  $\text{TeO}_2$  박막의  $E_{op}$ 는 3.5 eV로 보고되었다 [19]. 본 연구에서  $\text{TeO}_2$ 와 가장 유사한 조성을 보이는 M0.43의  $E_{op}$ 는 3.22eV로 선행 연구결과와 큰 차이를 보이지 않았다.

또한  $\text{TeO}_2$  타겟에 의해 제작된 박막들의  $E_{op}$ 는 스퍼터링 가스조성비 중에서 산소의 비중이 증가할수록 0.99, 3.05, 3.29eV 순으로 증가하였다. Te 타겟에 의해 제작된 박막들의  $E_{op}$  역시 1.01, 3.22, 3.35eV 순으로 같은 경향을 보였다.

특히, XPS 분석에서 규명했던  $\text{TeO}_x$  박막의 조성비를 1 < x < 2와 2 < x < 3 범위로 구분하였을 경우, 광학 특성인  $E_{op}$ 값 역시 확연히 다른 특성을 보인다고 할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는  $\text{TeO}_2$  타겟과 Te 타겟으로 Ar과  $\text{O}_2$ 의 가스 조성비를 각각 세가지 조건(C0, C0.25, C1, M0.11, M0.43, M1)으로 실험함으로써 다양한 조성비를 갖는 비정질의  $\text{TeO}_x$  박막을 제작할 수 있었고, 제작된 박막에 대하여 화학량 및 광학적 특성에 대한 연구를 수행하였다.

XPS, IR spectrum 분석을 통하여 스퍼터링 가스 조성비에 따라  $\text{TeO}_x$  박막의 조성비를 계산하였고, x값이 크게 두가지 범위를 갖음을 알 수 있었다.  $\text{TeO}_2$  타겟으로 제작된 샘플의 조성비는 1.42부터 2.42였으며, Te 타겟으로 제작된 샘플의 조성비는 1.68에서 2.21까지의 범위를 보였다. 1 < x < 2 범위를 갖는 C0, M0.11 박막은  $\text{TeO}_2$  내의 Te 이온( $\text{Te}^{4+}$ )와 Te 금속( $\text{Te}^0$ )에 의한 피크가 확인되었으며, Te 금속과  $\text{TeO}_2$ 로 구성됨을 알 수 있었다. 2 < x < 3 범위를 갖는 C0.25, C1, M0.43, M1 박막에서는  $\text{TeO}_2$  내의 Te 이온( $\text{Te}^{4+}$ )만 존재하였고, Te 금속에 대응하는 피크는 나타나지 않았다.

Ellipsometer 분석에서  $\text{TeO}_x$  박막의 굴절률은 타겟에 상관없이 스퍼터링 가스 조성비 중 산소의 함량이 증가할수록 감소함을 보였다.

TeO<sub>x</sub> 박막은 1<x<2인 경우 가시광 영역에서는 10% 미만의 투과율을 보였지만, 2<x<3인 경우 80% 이상의 우수한 투과율을 보였다.

E<sub>op</sub> 결과를 통해 TeO<sub>x</sub> 박막은 O<sub>2</sub>/Ar 가스비율이 증가할수록 E<sub>op</sub>가 증가하는 경향을 나타내었으며, 1<x<2 와 2<x<3 범위내에서는 각각 서로 다른 광학특성을 보였다.

본 연구를 통하여 평가된 다양한 조성의 TeO<sub>x</sub> 박막은 상이한 광학적 특성을 보이며, 이를 활용한 광전소자 응용에 관한 추가적인 연구가 진행 중에 있다.

### 감사의 글

본 연구는 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. NRF-2016R1A2B4014848)으로 수행된 연구임.

### REFERENCES

- [1] A. Mecseki, I. Foldvari, and R. Voszka, *Acta Phys. Acad. Sci. Hung.*, **53**, 15 (1982). [DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/BF03156172>]
- [2] I. Abdulhalim, C. N. Pannell, J. Wang, G. Wylangowski, and D. N. Payne, *J. Appl. Phys.*, **75**, 519 (1994). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.355832>]
- [3] T. Yano, A. Fukumoto, and A. Watanabe, *J. Appl. Phys.*, **42**, 3674 (1971). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1659667>]
- [4] V. M. Kotov, G. N. Shkerdin, D. G. Shkerdin, and E. V. Kotov, *J. Opt. Technol.*, **72**, 511 (2005). [DOI: <https://doi.org/10.1364/JOT.72.000511>]
- [5] R. Nayak, V. Gupta, A. L. Dawar, and K. Sreenivas, *Thin Solid Films*, **445**, 118 (2003). [DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0040-6090\(03\)01284-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0040-6090(03)01284-7)]
- [6] N. Dewan, V. Gupta, K. Sreenivas, and R. S. Katiyar, *J. Appl. Phys.*, **101**, 084910 (2007). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.2717139>]
- [7] M. Takenaga, N. Yamada, K. Nishiuchi, N. Akahira, T. Ohta, S. Nakamura, and T. Yamashita, *J. Appl. Phys.*, **54**, 5376 (1983). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.332716>]
- [8] S. M. Pietralunga, M. Lanata, M. Fere, D. Piccinin, G. Cusmai, M. Torregiani, and M. Martinelli, *Opt. Express*, **16**, 21662 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.16.021662>]
- [9] K. Arshak and O. Korostynska, *Sensors*, **2**, 347 (2002). [DOI: <https://dx.doi.org/10.3390/s20800347>]
- [10] T. Siciliano, M. D. Giulio, M. Tepore, E. Filippo, G. Micocci, and A. Tepore, *Sens. Actuators, B.*, **138**, 550 (2009). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.snb.2009.02.068>]
- [11] T. Siciliano, M. D. Giulio, M. Tepore, E. Filippo, G. Micocci, and A. Tepore, *Vacuum*, **84**, 935 (2010). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.vacuum.2009.12.017>]
- [12] M. F. Al-Kuhaili, S.M.A. Durrani, E. E. Khawaja, and J. Shirokoff, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **35**, 910 (2002).
- [13] S.N.B. Hodgson and L. Weng, *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, **18**, 145 (2000). [DOI: [10.1023/A:1008717003930](https://doi.org/10.1023/A:1008717003930)]
- [14] N. Dewan, K. Sreenivas, and V. Gupta, *J. Cryst. Growth*, **305**, 237 (2007). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2007.03.054>]
- [15] L. I. Qinghui, G. U. Donghong, and G.A.N. Fuxi, *J. Mater. Sci. Technol.*, **20**, 678 (2004).
- [16] N. Uchida, *Phys. Rev. B.*, **4**, 3736 (1971). [DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.4.3736>]
- [17] M. D. Giulio, R. Rella, P. Siciliano, and S. Cucurachi, *Vacuum*, **43**, 305 (1992). [DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0042-207X\(92\)90161-O](http://dx.doi.org/10.1016/0042-207X(92)90161-O)]
- [18] A. Mansingh and S. Kumar, *Thin Solid Films*, **161**, 101 (1988). [DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0040-6090\(88\)90240-4](http://dx.doi.org/10.1016/0040-6090(88)90240-4)]
- [19] S.K.J. Al-Ani and C. A. Hogarth, *Int. J. Electron.*, **58**, 123 (1985). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00207218508939009>]