


# FTS 시스템으로 제작한 $\text{Cu}_2\text{O}/\text{CuO}$ 박막의 산소 유량비에 따른 특성 평가

김수지, 김지형, 김경환, 홍정수 

가천대학교 전기공학과

## Characteristic of $\text{Cu}_2\text{O}/\text{CuO}$ Thin Films Fabricated by FTS System Based on Oxygen Flow Ratio

Suji Kim, Jihyung Kim, Kyunghwan Kim, and Jeongsoo Hong

Department of Electrical Engineering, Gachon University, Seongnam 13120, Korea

(Received October 8, 2024; Revised November 7, 2024; Accepted November 11, 2024)

**Abstract:** In this study, copper oxide thin films were fabricated by facing target sputtering system and their structural, optical, and electrical properties were investigated. Crystal phase of samples were changed by variation of oxygen flow rate from Cu to  $\text{Cu}_2\text{O}$  and  $\text{CuO}$ . Compared to Cu metal film, electrical properties of  $\text{Cu}_2\text{O}$  and  $\text{CuO}$  were relatively degraded, however, as-fabricated  $\text{Cu}_2\text{O}$  and  $\text{CuO}$  indicated still low resistivity ( $\sim 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ ) and high carrier concentration ( $\sim 10^{19} \text{cm}^{-3}$ ). From the results, it is thought that the copper oxide thin films  $\text{Cu}_2\text{O}$  fabricated under optimal conditions can be applied to various optoelectronic devices including ultraviolet photodetector.

**Keywords:**  $\text{Cu}_2\text{O}$ ,  $\text{CuO}$ , FTS, Heterojunction

### 1. 서론

자외선(UV) 광 검출기, 특히 UV-C (200~280 nm) 광 검출기는 광전자 소자 중에서도 뛰어난 성능을 보인다. 고감도와 작은 노이즈를 갖춘 UV-C 광 검출기는 화재 감지, 미사일 탐지 및 위성 통신과 같이 매우 높은 신뢰도가 필요한 다양한 분야에서 우수한 성능을 나타낸다 [1-3].

UV-C 광 검출기의 주요 재료로 산화갈륨( $\text{Ga}_2\text{O}_3$ )이 주목받고 있다. 산화갈륨은 제작 조건에 따라  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\epsilon$ 의 다양한 결정상을 나타내며 [1,2,4,5], 그중  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$ 는 ultrawide band gap (4.8~4.9 eV)을 가지며, 다른

ultrawide band gap 재료에 비해 상대적으로 녹는점이 낮기 때문에 용융 기반 기법(float zone, czochralski, vertical Bridgman, EFG) 등을 통해 단결정 혹은 고품질의 대면적 기판으로 쉽게 제조될 수 있다 [1,3-6]. 또한, 넓은 밴드갭과 높은 신뢰성, 그리고 뛰어난 열적·화학적 안정성으로 인해 UV-C 영역을 감지하는 특성이 우수하다 [1,2]. 그러나 n-type 특성을 나타내는  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$ 는 p-type 특성을 나타내는 소재로 제작하는 점이 어렵기 때문에 homojunction 소자에 적용하는 데 한계가 발생한다. 따라서  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  기반 광 검출기는 다른 p-type 물질과의 PN 접합 구조로 연구되었으며, 이와 함께 사용하기 적합한 p-type 물질을 찾는 것이 매우 중요하다 [3,6].

PN 접합 구조의 p-type 재료로는  $\text{NiO}$ ,  $\text{SnO}$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$ 와 같은 다양한 산화물 반도체 소재가 연구되고 있다 [7,8]. 이 중, 구리 산화물은 우수한 광학적 특성과 함께 p-type 전

✉ Jeongsoo Hong; hongjs@gachon.ac.kr

Copyright ©2025 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.

기적 특성을 나타내기 때문에 주목되고 있으며 가격이 저렴하다. 이러한 장점으로 인해 구리 산화물은 광 검출기, 태양 전지와 같은 광전자 소자를 비롯한 다양한 분야에서 널리 사용되고 있으며, 이에 대한 연구가 활발히 이뤄지고 있다 [9].

구리 산화물(copper oxide)은  $\text{Cu}_2\text{O}$  (cuprous oxide, cuprite),  $\text{Cu}_4\text{O}_3$  (paramelaconite)와  $\text{CuO}$  (cupric oxide, tenorite)과 같은 결정상을 나타내며, 각각의 결정상에 따라 서로 다른 구조, 광학적 특성, 전기적 특성 및 구리 이온의 산화 상태를 갖는다 [10,11]. 이 중,  $\text{Cu}_2\text{O}$ 는 cubic 구조를 가지며 p-type 전기적 특성을 나타내는 소재로 PN 접합 구조에 활용될 수 있는 소재로 밴드갭 에너지는 대략 2.1~2.6 eV를 나타낸다. Tenorite로 알려진  $\text{CuO}$ 는 monoclinic 구조로 1.2~1.5 eV의 밴드갭 에너지를 나타낸다 [10-14].  $\text{Cu}$ 의 산화 상태는 각 상마다 다르지만 모두 native defects를 형성하여 일반적으로 p-type 특성을 갖는다. P-type 전도 특성은 metal vacancy와 interstitial oxygen으로부터 유도된다. 정공의 이동 경로가 되는 가전자대 edge 또한 산소 2p와 구리 3d 오비탈의 혼성구조로 이루어져 있기 때문에 가전자대가 비편재화된 특성을 보이며 이로부터 발생된 높은 이동도를 가질 수 있게 된다 [7].

이러한 구리 산화물 박막은 스퍼터링법, 열 증발법, 전자빔 증착법, ALD 등의 다양한 방법으로 제작할 수 있다 [7,9,11-14]. 이 중에서도 스퍼터링법은 낮은 증착 온도에서 박막을 균일하게 증착할 수 있기 때문에 많은 관심을 받고 있다. 그러나 DC-스퍼터링, RF-스퍼터링과 같은 일반적인 스퍼터링 방법은 기판이 플라즈마 내에 위치하므로 고에너지 입자 충돌에 의해 박막 표면의 손상을 초래하여 박막의 특성을 저하시키는 문제가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 facing target sputtering (FTS) 시스템을 이용하여 구리 산화물 박막을 증착하였다. FTS 시스템은 그림 1과 같이 챔버 내에 두 개의 타깃을 서로 마주 보도록 배열하고, 플라즈마 영역 밖에 기판을 배치하는 구조로 설계되었다. 이러한 구조는 기판으로의 고에너지 입자 충돌을 억제하여 플라즈마에 의한 박막 표면 손상을 최소화하고 낮은 거칠기의 고품질 표면을 가지는 박막을 형성할 수 있다. 또한, 타깃 뒷면에 위치한 영구자석이 생성하는 자계는 한쪽 타깃에서 생성되는 2차 전자를 반대쪽 타깃으로 강하게 끌어당기면서 2차 전자를 왕복 운동하게 한다. 이렇게 양쪽 타깃 사이의 공간을 왕복하는 현상을 cyclotron motion이라 하며, 자계에 의해 플라즈마 영역 안에서만 2차 전자를 구속할 수 있게 된다. 일반적인 마그네트론 스퍼터링 시스템과 달리 FTS는 타깃 양쪽에 고정자를 두어 2

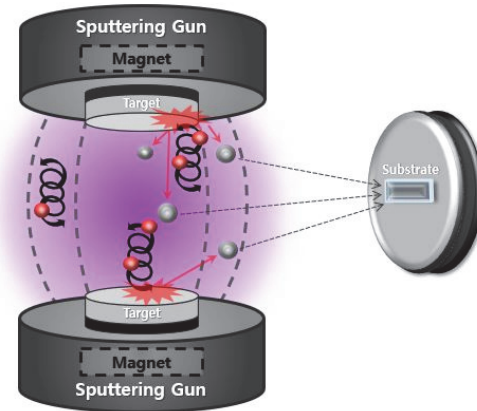


Fig. 1. Schematic of FTS system.

차 전자 반복운동만을 유도하기 때문에 강자성체 물질을 타깃으로 사용할 수 있다는 장점이 있으며, 2차 전자가 나선형 자기장에 갇혀 있어 상대적으로 더 높은 밀도의 플라즈마를 생성할 수 있다 [15,16].

본 연구에서는 FTS 시스템을 이용하여  $\text{Cu}$  target을 장착 후, 산소 유량비 제어를 통한 반응성 마그네트론 스퍼터링으로 박막을 제작하였다. 산소 유량비의 제어를 통해  $\text{Cu}$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$ ,  $\text{CuO}$  결정상을 선택적으로 증착하고, 구리 산화물의 상 변화에 따른 특성을 확인할 수 있었다. 이를 통해  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 와의 이종 접합 재료로 사용될 수 있는 최적 조건의 구리 산화물 박막 제작과 자외선 광 검출기뿐만 아니라 다양한 광전자 소자의 성능 향상이 기대된다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 실험 조건

4-inch  $\text{Cu}$  target (99.99%)을 이용하여 그림 1과 같은 FTS system으로 100 nm 두께의 구리 산화물을 제작하였다. 기판은  $76 \times 26 \times 1 \text{ mm}^3$  크기의 soda-lime glass 기판을 사용하였다. 증착 전에 기판 표면의 불순물을 제거하기 위해 유리 기판은 acetone, isopropyl alcohol (IPA), deionized (D.I.) water에 각각 10분씩 초음파 세척기를 이용하여 세척되었으며, 이후  $\text{N}_2$  가스로 건조되었다. 기판의 온도는 상온으로 유지되었다.

$\text{Ar}$ 과  $\text{O}_2$ 는 mass flow controller (MFC)를 통해 일정하게 진공 챔버에 주입되었다. 공정을 시작하기 전, 10분 동안의 pre-sputtering을 통해 타깃과 챔버 표면에 붙은 이물질을 제거하여 박막의 품질을 향상시키고 플라즈마가

**Table 1.** Details for sputtering conditions.

Parameters	Conditions
Targets	Cu (4N, 99.99%)
Substrate	Soda-lime glass
Base pressure (Torr)	$1.1 \times 10^{-5}$
Working pressure (mTorr)	2
Ar gas flow rate (sccm)	10
O <sub>2</sub> gas flow rates (sccm)	0~15
Input power (W)	40
Thickness (nm)	100

안정화된 후 증착을 진행하였다.

구리 산화물 박막은 다양한 조건에서 제작되었다. 먼저, Ar 분위기에서 Cu 박막을 증착하였고 이후 산소 유량비에 따른 구리 산화물의 상 변화를 관찰하기 위해서 산소 유량비를 변화시키면서 박막을 증착하였다. 산소 유량비 변화에 따라 공정 압력은 대략 0.2 mTorr 정도의 미세한 변화가 발생되었지만 메인 밸브를 제어하여 공정 압력을 일정하게 유지하였다. KLA-Tencor alpha step D-500 stylus profiler를 사용하여 박막의 두께를 측정했다.

보다 자세한 스퍼터링 조건은 표 1을 통해 확인할 수 있다.

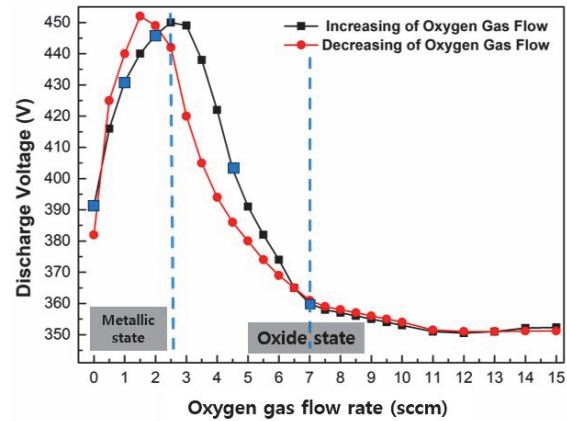
### 2.2 박막의 특성 평가

구리 산화물 박막의 구조적 특성을 분석하기 위해 X-ray diffraction (XRD)와 field emission scanning electron microscopy (FE-SEM)을 이용하여 측정하였다. 광학적 특성을 확인하기 위해 UV-Vis spectrophotometer를 이용하여 파장별 투과율을 측정하고 tauc plot을 통해 박막의 광학적 밴드 갭을 산출하였다. 마지막으로, hall effect measurement를 이용하여 캐리어 농도와 이동도, 비저항을 측정한 후 전기적 특성을 평가하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 산소 유량비에 따른 방전 전압의 변화

본 연구에서는 구리 산화물 박막을 반응성 마그네트론 스퍼터링 방식을 통해 제작하였다. 반응성 스퍼터링은 불활성 가스인 Ar 가스 외에 다른 반응성 가스를 주입하여 타깃 물질과 반응을 일으켜 증착하는 방식으로, 주입하는



**Fig. 2.** Discharge voltage as a function of oxygen gas flow rate in the range of 0~15 sccm.

반응성 가스의 유량비에 따라 증착률, 박막 조성과 특성 등이 큰 변화를 보인다. 반응성 가스가 주입되면 타깃 표면에서는 화학반응이 발생하여 화합물층이 형성된다. 이때 형성된 화합물층보다 금속 타깃 표면이 훨씬 큰 스퍼터링률을 가지기 때문에, 박막 증착 특성은 화합물층의 형성 유무에 따라 급격히 바뀌게 된다. 화합물층이 형성되지 않아 타깃 표면 전체에서의 큰 스퍼터링률에 의해 박막 증착률이 높은 것을 금속 모드라 하며, 화합물층의 형성으로 인해 전체 스퍼터링률이 감소하고 박막 증착률이 낮아지는 것을 화합물 모드라고 한다 [17].

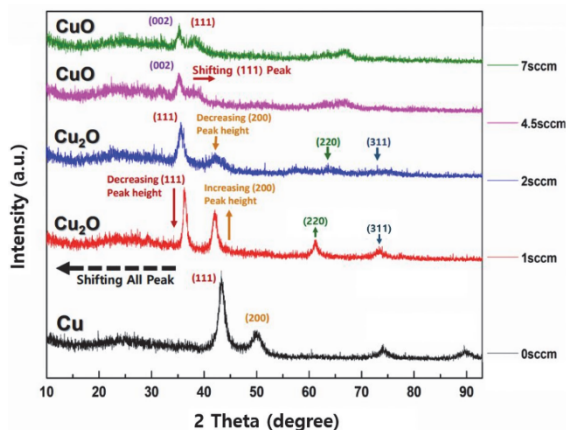
그림 2는 구리 타깃을 이용한 반응성 마그네트론 스퍼터링에서 산소 유량비에 따른 방전전압의 변화를 나타낸 그래프이다. Input power 40 W와 Ar 10 sccm을 고정하고 산소 가스 유량비를 0~15 sccm으로 변화시켜 주입하였으며, 2 mTorr의 공정 압력(working pressure)을 유지하였다. Ar 분위기에서 산소 유량비를 증가시킨 경우, 방전 전압은 급격히 증가하다가 산소 유량 2.5 sccm일 때 최대치를 가지며 이후 감소하다 산소 유량 7 sccm에서부터 일정해지는 경향을 나타낸다. 반대로 산소 유량비를 10 sccm에서 감소시킨 경우, 방전전압은 서서히 증가하다가 산소 유량 1.5 sccm일 때 최대치를 가진 후 급격히 감소한다. 최대 방전전압치를 가지는 산소 유량은 산소 유량비를 증가시킬 경우 2.5 sccm에서 나타나고 감소시킬 경우에 1.5 sccm에서 나타나지만 전체적인 그래프의 변화는 유사한 형태를 나타낸다. 동일한 공정 압력에서 산소 유량비가 증가할 경우와 감소할 경우를 비교했을 때, 최대 방전 전압에 해당되는 산소 유량이 감소할 경우가 더 낮은 이유는 타깃 표면에 산화물층이 완전히 스퍼터링 되지 않고 남아 있기 때문으로 사료된다 [16,18].

산소 유량비를 증가시킬 경우의 그래프 곡선을 보면, 0~2.5 sccm에서는 산소 유량비의 증가에 따라 방전전압도 증가한다. 이는 캐소드에서 방출된 일부 전자가 산소 원자에 결합하여 마이너스 산소 이온을 형성하기 때문에 전자가 감소하게 되고 인가된 전력을 유지하기 위해 방전전압은 증가한다. 2.5~7 sccm에서는 구리 타깃 표면에 산화물층이 형성되기 때문에 전체 스퍼터링률이 감소하고 증착률은 낮아진다. 또한 전자가 더 많이 방출되어 가스의 이온화가 활성화되고 전자의 증가로 인해 캐소드 전압이 낮아지게 된다 [18].

다른 증착 조건을 고정한 경우에서 반응성 기체의 유량비를 변화시켰을 때, 반응성 기체의 유량비 증가에 따라 화합물층 형성 면적은 증가하였고 반응성 기체 유량이 특정 값을 가질 경우 금속 모드와 화합물 모드로의 급격한 변화를 확인할 수 있었다 [17].

### 3.2 제작한 박막의 구조적 특성

그림 3은 그림 2의 결과를 기반으로 산소 유량비에 따른 방전전압의 변화가 발생한 구간인 산소 유량비 0, 1, 2, 4.5, 7 sccm의 조건을 기준으로 제작된 구리 산화물 박막의 XRD 측정 결과를 나타낸다. 확인한 결과, Ar 분위기에서 증착된 박막은 Cu peak (JCPDS 04-0836)를 나타냄을 확인할 수 있었으나, 산소의 주입에 의해 산소 유량비 1 sccm과 2 sccm에서는  $\text{Cu}_2\text{O}$  peak (JCPDS 05-0667), 4.5 sccm과 7 sccm에서는 CuO peak (JCPDS 45-0937)의 좁고 뚜렷한 peak를 관찰하여, 산소 유량비 증가에 따른 구리 산화물 박막의 상변화를 확인하였다. Ar 분위기에서 증착된 구리 박막은  $43.27^\circ$ ,  $49.89^\circ$ ,  $74.44^\circ$ ,  $89.72^\circ$ 에서

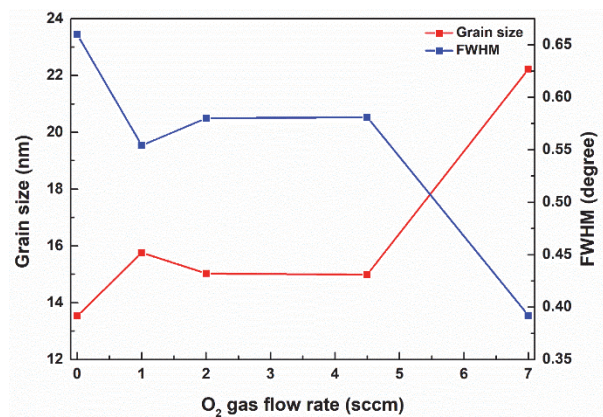


**Fig. 3.** The XRD patterns of the Cu/Cu<sub>2</sub>O/CuO films at various oxygen gas flow rates.

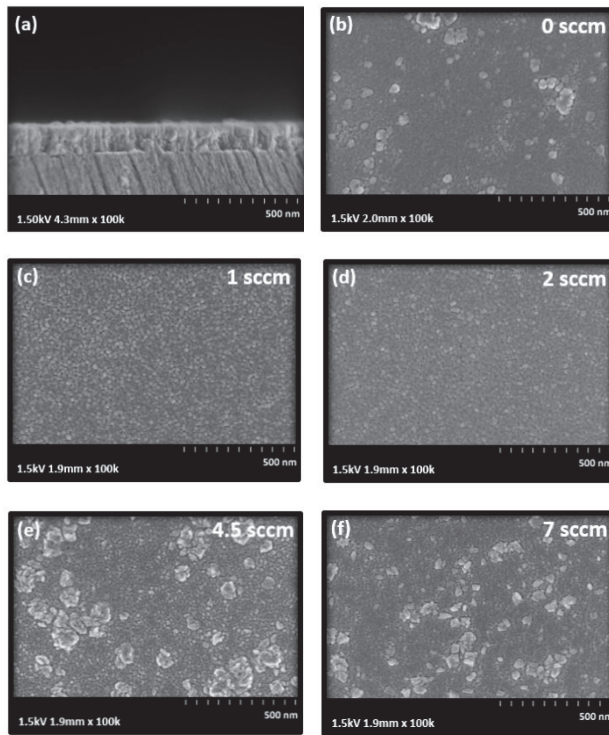
뚜렷한 XRD peak가 나타났으며, 이것은 각각 (111), (200), (220), (311)의 peak를 나타낸다. 산소가 주입되며 모든 peak는 좌측으로 shift 되는 경향을 보이고 구리 산화물의 상이 나타남을 확인하였다. (111)에 해당하는 peak는 Ar 분위기에서 증착된 구리 박막에서 가장 높은 강도를 가졌으며 산소 유량비 증가에 따라 점차 감소한다. (200)과 (220)에 해당하는 peak의 강도는 산소 유량비 1 sccm에서 가장 높은 강도를 가지고 이후 산소 유량비 증가에 따라 감소한다. 산소 유량비 4.5 sccm부터는 CuO peak에 해당되는 곳에서 (002) peak가 나타남에 따라  $2\text{Cu}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{CuO}$ 의 반응으로  $\text{Cu}_2\text{O}$ 에서 CuO로 상변화가 일어났음을 확인하였으며, 산소 유량비가 증가함에 따라 구리 산화물(CuO) 박막의 결정 선호 방향이 (111)에서 (002)로 변화하였다.

구리 산화물 박막 결정의 평균 입자 크기는 Scherrer equation 방정식을 이용하여 계산하였으며 그 결과를 그림 4에 나타냈다 [13,19]. 그림 4는 산소 유량비에 따른 (111) peak와 (002) peak의 반치폭과 결정의 평균 입자 크기 변화를 나타낸 것이다. 0~2 sccm에서 나타난 (111) 면의 peak는 4.5 sccm부터 뚜렷하지 않아 (002) peak로 대체하였다 [13,19]. 일반적으로 결정의 평균 입자 크기가 커질수록 반치폭은 작아진다. 그림 4에서 알 수 있듯이 결정의 평균 입자 크기가 증가함에 따라 반치폭은 감소하였으며 구리 산화물 박막은 나노미터 단위의 매우 작은 결정 크기를 가졌다. 추가적인 구리 산화물 박막의 결정학적 특성을 평가하기 위해 SEM 분석을 실시하였다.

그림 5는 산소 유량비에 따른 SEM 측정 결과이다. 그림 5(a), (b)는 Ar 분위기에서 증착된 구리 박막이며, 그림 5(b)~(f)는 산소 유량비에 따른 구리 산화물을 나타낸다.



**Fig. 4.** The grain sizes of the Cu/Cu<sub>2</sub>O/CuO films at various oxygen gas flow rates.



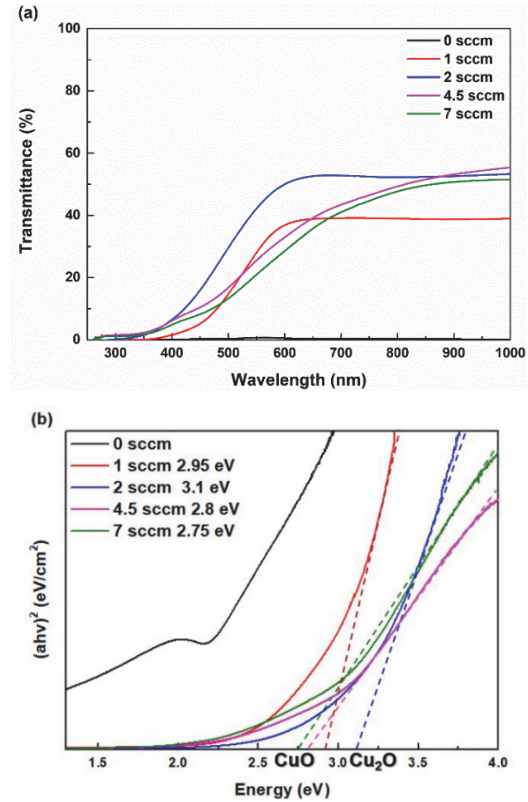
**Fig. 5.** The SEM images of samples: (a) the section of Cu film fabricated at an oxygen gas flow rate of 0 sccm and (b) the surfaces of Cu/Cu<sub>2</sub>O/CuO fabricated at oxygen gas flow rates 0 sccm, (c) 1 sccm, (d) 2 sccm, (e) 4.5 sccm, and (f) 7 sccm.

그림 6(a)를 통해 증착된 박막의 두께는 약 100 nm로 확인되었다. 산소 주입 없이 제작된 샘플은 거친 표면 형태를 나타냈으나 소량의 산소 주입(1, 2 sccm)에 따라 고르고 균일한 표면을 나타냈다. 하지만 과도한 산소 주입(4.5, 7 sccm)에 의해 거친 표면 형상을 나타냈으며, 이에 대한 원인으로서는 그림 3에서 확인되었던 상변화에 따른 결과로 생각된다.

### 3.3 제작한 박막의 광학적 특성

그림 6은 UV-Vis spectrophotometer를 이용하여 구리 산화물 박막의 파장별 투과율을 측정하고 tauc plot을 통해 박막의 광학적 밴드갭 에너지를 산출하였다. 제작된 구리 산화물 박막은 가시광선 영역에서 투과율이 급격히 감소하였고 60% 미만의 투과율을 보였으나 구리에서 산화물로 변하는 과정에서 투과율의 향상이 확인되었다.

그림 6(b)는 구리 산화물 박막의 광학적 밴드갭 에너지를 비교하기 위한 Tauc plot이며 그림 6(a)의 투과율과 다음 식 (1)을 이용하였다.



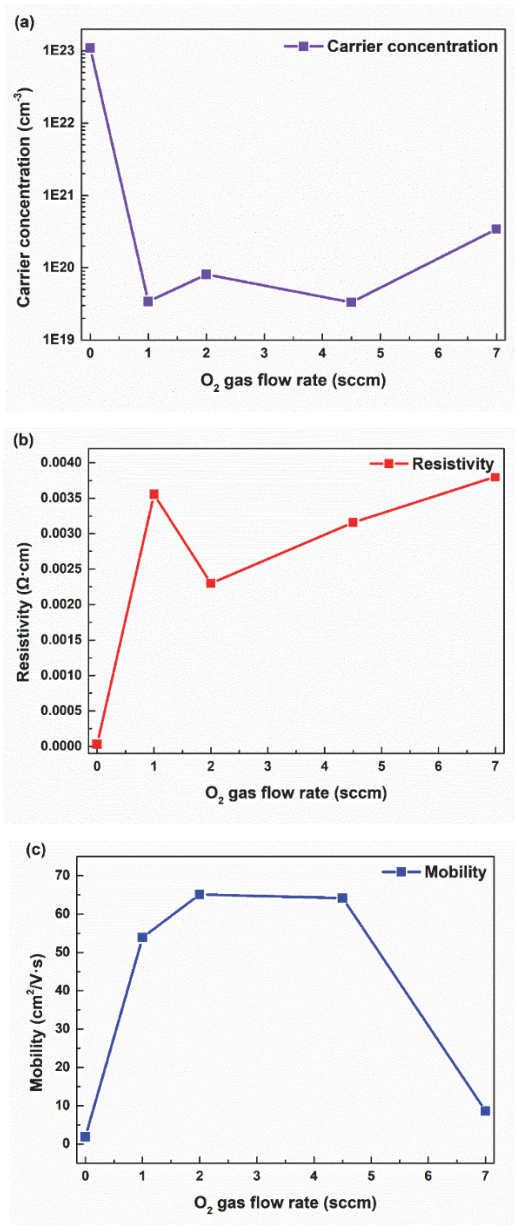
**Fig. 6.** The optical properties of the Cu/Cu<sub>2</sub>O/CuO thin films: (a) transmittance and (b) tauc plot of the Cu/Cu<sub>2</sub>O/CuO thin films.

$$(ahv)^n = A(hv - E_g) \tag{1}$$

여기서,  $\alpha$ 는 흡수 계수,  $h\nu$ 는 광자 에너지( $h$ 는 플랑크 상수,  $\nu$ 는 전자의 진동수),  $A$ 는 상수,  $E_g$ 는 광학적 밴드갭 에너지, 그리고  $n$ 은 indirect와 direct 광학적 밴드갭 구조에 따라 각각 1/2와 2의 값을 갖는다. 구리 산화물 박막의 경우  $n=2$ 로 계산되었다 [1,13].

FTS로 증착된 구리 산화물 박막의 광학적 밴드갭 에너지는 산소 유량비가 증가함에 따라 증가했으며, 산소 유량비가 2 sccm일 때 약 3.1 eV의 최댓값을 가졌으나, 이후 4.5 sccm부터는 수치가 감소하였다. 물질의 밴드갭 에너지는 물질의 고유 특성, 결정성, 계면결함 등에 의해 결정된다 [20]. 그림 3에서 확인된 XRD 패턴에 따르면, 산소 유량비 0 sccm에서는 구리 박막이, 1~2 sccm에서는 Cu<sub>2</sub>O가, 4.5~7 sccm에서는 Cu가 증착되었음을 확인할 수 있었다. 따라서 4.5 sccm부터 광학적 밴드갭 에너지가 감소하는 이유는 산소 유량비가 증가함에 따라 Cu<sub>2</sub>O에서 CuO로의 상 변화에 따른 결과로 사료된다 [11-14]. 또한 광학적 밴드갭 에너지의 변화와 결정의 평균 입자 크기의

관계는 quantum size effect를 통해서도 확인할 수 있다. Quantum size effect는 나노미터 스케일에서 결정립의 크기가 작아질수록 양자적 특성으로 인해 밴드갭 에너지가 증가하는 현상을 나타낸다 [21]. 구리 산화물 박막 결정의 평균 입자 크기가 15.7 nm에서 15.0 nm로 감소함에 따라 대략 2.95 eV에서 3.10 eV로 증가하는 것을 확인하였으며, 14.9 nm에서 22.2 nm로 증가함에 따라 대략 2.80 eV에서 2.75 eV로 감소됨을 확인할 수 있었다.



**Fig. 7.** The electrical properties of the Cu/Cu<sub>2</sub>O/CuO thin films (a) carrier concentration, (b) resistivity, and (c) mobility.

### 3.4 제작한 박막의 전기적 특성

그림 7은 산소 유량비 제어를 통한 구리 산화물 박막의 전기적 특성을 나타내고 있다. 산소를 주입하지 않았을 때는 Cu 박막이 형성되었으며 이로 인해 가장 높은 캐리어 농도와 낮은 비저항을 나타냈다. 하지만 산소의 주입으로 인해 산소 유량이 1, 2 sccm에서 Cu<sub>2</sub>O, 4.5, 7 sccm에서는 CuO 산화물 박막이 형성됨에 따라 캐리어 농도는 감소하고 비저항은 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그림 7(a)의 캐리어 농도의 경우, 산화물이 형성됨에 따라 Cu에 비해 현저히 낮은 수치를 나타내지만 산소 유량비의 변화에도 큰 변화는 확인되지 않았다. 그림 7(b), (c)를 보면, 산화물 형성 이후에 Cu<sub>2</sub>O 결정상이 나타난 2 sccm에서 낮은 비저항( $2.3 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ ) 및 높은 이동도( $65.1 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ )를 확인할 수 있지만 CuO를 형성하며 비저항은 증가하고 이동도는 감소됨을 확인할 수 있었다. 결과적으로, 제작된 샘플은 산소 주입에 따른 결정상의 변화에 따라 전기적 특성이 변화하는 것을 확인할 수 있었으며  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 와의 이종 접합 재료로서의 최적 조건을 확보하기 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

## 4. 결론

본 논문에서는  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 와의 이종 접합 재료로서 자외선 광 검출기에 이용할 수 있는 구리 산화물 박막을 제작하기 위한 연구를 수행하였다. 부드러운 표면을 가진 고품질 박막을 제작할 수 있는 FTS system을 활용하여 박막을 제작하였으며 산소 유량비에 따른 구리 산화물 박막의 특성 변화에 대해 확인했다. 그 결과, 산소 주입량에 따라 Cu, Cu<sub>2</sub>O, CuO의 결정상이 변화하는 것과 함께 결정상의 변화가 전기적 특성, 광학적 특성에 영향을 주는 것을 확인했다.

산소 유량비 제어로 발생하는 결정상 변화를 통해 최적의 특성을 나타내는 구리 산화물 박막을  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 와의 이종 접합 재료로 사용한다면 계면 특성 및 결정 구조 차이로 인해 박막의 접착력 저하 및 특성의 변화가 발생할 수 있을 것으로 예상되지만, 추가적인 연구를 진행하여 발생하는 문제점을 개선해 간다면 자외선 광 검출기뿐만 아니라 다양한 광전자 소자의 성능 향상에서도 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

### ORCID

Jeongsu Hong

<https://orcid.org/0000-0002-5946-7815>

## 감사의 글

이 연구는 2023년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원(RS-2023-00227306) 및 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (P0012451, 2022년 산업혁신인재성장지원사업).

## REFERENCES

- [1] S. Park, Y. Yoon, H. Kim, T. Park, K. Kim, and J. Hong, *Nanomaterials*, **13**, 954 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.3390/nano13050954>
- [2] M. E. Ayhan, M. Shinde, B. Todankar, P. Desai, A. K. Ranade, M. Tanemura, and G. Kalita, *Mater. Lett.*, **262**, 127074 (2020).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.127074>
- [3] B. Sun, W. Sun, S. Li, G. Ma, W. Jiang, Z. Yan, X. Wang, Y. An, P. Li, Z. Liu, and W. Tang, *Opt. Commun.*, **504**, 127483 (2022).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2021.127483>
- [4] D. Guo, Q. Guo, Z. Chen, Z. Wu, P. Li, and W. Tang, *Mater. Today Phys.*, **11**, 100157 (2019).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2019.100157>
- [5] J. D. Blevins, D. Thomson, K. Stevens, and G. Foundos, *Proc. CSMANTECH* (Indian wells, USA, 2017) p. 22.  
doi: [https://csmantech.org/wp-content/acfrcwdownloads/field\\_5e8cddf5ddd10/post\\_4271/14.2.pdf](https://csmantech.org/wp-content/acfrcwdownloads/field_5e8cddf5ddd10/post_4271/14.2.pdf)
- [6] J. Yu, L. Dong, B. Peng, L. Yuan, Y. Huang, L. Zhang, Y. Zhang, and R. Jia, *J. Alloys Compd.*, **821**, 153532 (2020).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153532>
- [7] M. Choe, D. Jeon, I. Hwang, and I. H. Baek, *Ceramist*, **26**, 75 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.31613/ceramist.2023.26.1.06>
- [8] G. H. Lee, S. Y. Moon, H. J. Lee, M. C. Shin, Y. J. Kim, G. Y. Jeon, J. M. Oh, W. H. Shin, M. K. Kim, C. H. Park, and S. M. Koo, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **36**, 413 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2023.36.4.14>
- [9] S. Park, Y. Yoon, H. Kim, T. Park, K. Kim, and J. Hong, *Nanomaterials*, **13**, 954 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.3390/nano13050954>
- [10] M. Heinemann, B. Eifert, and C. Heiliger, *Phys. Rev. B*, **87**, 115111 (2013).  
doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.87.115111>
- [11] R. Bunea, A. K. Saikumar, and K. Sundaram, *Mater. Sci. Appl.*, **12**, 315 (2021).  
doi: <https://scirp.org/journal/paperinformation?paperid=110323>
- [12] E. C. Nwanna, P. E. Imoisili, S. O. Bitire, and T. C. Jen, *Coatings*, **11**, 1545 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.3390/coatings11121545>
- [13] Ş. Korkmaz, B. Gecici, S. D. Korkmaz, R. Mohammadigharehbagh, S. Pat, S. Özen, V. Şenay, and H. H. Yudar, *Vacuum*, **131**, 142 (2016).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2016.06.010>
- [14] W. Maeng, S. H. Lee, J. D. Kwon, J. Park, and J. S. Park, *Ceram. Int.*, **42**, 5517 (2016).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.12.109>
- [15] J. S. Hong, N. Matsushita, and K. H. Kim, *Thin Solid Films*, **531**, 238 (2013).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2013.01.089>
- [16] J. S. Hong, S. M. Kim, and K. H. Kim, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **50**, 08KE02 (2011).  
doi: <https://doi.org/10.1143/JJAP.50.08KE02>
- [17] J. S. Hong and K. H. Kim, *Trans. Electr. Electron. Mater.*, **12**, 76 (2011).  
doi: <https://doi.org/10.4313/TEEM.2011.12.2.76>
- [18] J. S. Park, S. W. Park, T. W. Kim, S. K. Kim, and W. S. Ahn, *J. Korean Inst. Surf. Eng.*, **37**, 307 (2004).  
doi: <https://koreascience.kr/article/JAKO200414714129457.pdf>
- [19] J. Kaur, A. Khanna, R. Kumar, and R. Chandra, *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, **33**, 16154 (2022).  
doi: <https://doi.org/10.1007/s10854-022-08506-0>
- [20] H. Kim, S. Park, J. Hong, and K. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **36**, 576 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2023.36.6.6>
- [21] H. Kim, S. Park, K. Kim, and J. Hong, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **36**, 488 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2023.36.5.8>