



2013年 2月 석사학위 논문

InZnO 기반 투명산화물 트랜지스터의 전기적 특성변화에 대한 연구

조선대학교 대학원

전자공학과

이 영 준

InZnO 기반 투명산화물 트랜지스터의 전기적 특성변화에 대한 연구

A study of electrical performance of InZnO based transparent oxide transistor

2013년 2월 25일

조선대학교 대학원

전 자 공 학 과

이 영 준

InZnO 기반 투명산화물 트랜지스터의 전기적 특성변화에 대한 연구

지도교수 김 주 형

이 논문을 공학 석사학위신청논문으로 제출함

2012년 10월

조선대학교 대학원

전자공학과

이 영 준

조선대학교 대학원

2012년 11월

위 원 조선대학교 교 수 <u>이 강 현 (인)</u> 위 원 조선대학교 조교수 <u>김 주 형 (인)</u>

위원장 조선대학교 교 수 <u>김 정 화 (인)</u>

이영준의 석사학위논문을 인준함

제1장 서 론
제2장 본 론4 제1절 산화물 박막 트랜지스터
(Oxide Thin Film Transistor)
제3장 식헌 격과 및 고착
제1절 InZnO 기반 산화물 박막 및 트랜지스터의 제조를 위한 기판의 준비
특성 평가
1. 텅스텐 도핑에 따른 InZnO 산화물 (WInZnO) 박막의 특성 평가
2. 이트륨 도핑에 따른 InZnO 산화물 (YInZnO) 박막의 특성 평가

3. 탄탈륨 도핑에 따른 InZnO 산화물 (TaInZnO) 박막의

·· 28
•

제4절 가스 분압비에 따른 InZnO 기반 산화물
박막 트랜지스터의 특성 평가32
1. WInZnO 기반의 박막 트랜지스터
전류-전압(I-V) 특성33
2. YInZnO 기반의 박막 트랜지스터
전류-전압(I-V) 특성35
3. TaInZnO 기반의 박막 트랜지스터
전류-전압(I-V) 특성
제4장 결 론
참고문헌
연구실석

표 목 차

표 3-4 Ar/O₂ 가스 분압비에 따른 YInZnO 박막 트랜지스터의 특성 37 표 3-5 Ar/O₂ 가스 분압비에 따른 TaInZnO 박막 트랜지스터의 특성 39

도 목 차

그림	2-1	산화물 반도체 개발 초기 주역들4
그림	2-2	투명전자시대의 도래
그림	2-3	일반적인 Oxide 기반 TFT의 구조
그림	2-4	게이트 산화물의 유전 상수(dielectric constant) 대
		밴드갭(Band Gap) 그래프 ······8
그림	3-1	기판 전처리에 사용된 (a) 습식공정(cleaning wet station)과
		(b) 건조용 오븐
그림	3-2	박막 증착에 사용된 RF Magnetron co-sputtering의
		사진(왼쪽)과 공정 챔버의 내부 구조(오른쪽)10
그림	3-3	TaInZnO 박막을 채널층으로 이용한 박막 트랜지스터의
		소자 구조 12
그림	3-4	박막 분석에 사용된 분석 장비 (a) AFM,
		(b) 4-point probe, (c) FE-SEM, (d) HR-XRD and
		(e) UV-Vis-NIR spectrometer
그림	3-5	O_2 의 양에 따른 WInZnO 박막의 표면 이미지, 각각 다음의 O_2 분
		압비에 따라 박막이 형성되었음
		(a) $O_2=0$ sccm, (b) $O_2=1$ sccm, (c) $O_2=3$ sccm,
		(d) $O_2=5$ sccm, (e) $O_2=7$ sccm, (f) $O_2=10$ sccm $\cdots 14$
그림	3-6	Ar/O ₂ 분압비에 따른 WInZnO 박막의 XRD 측정 결과15
그림	3-7	Ar/O2 분압비에 따른 WInZnO 박막의 AFM 측정 결과16
그림	3-8	Ar/O2 분압비에 따른 WInZnO 박막의 투과도 측정 결과17
그림	3-9	Ar/O₂ 분압비에 따른 WInZnO 박막의 200℃에서
		후열처리 후 XRD 결과
그림	3-1() Ar/O ₂ 분압비에 따른 WInZnO 박막의 후열처리 후
		XRD 결과. 후열처리온도: (a) 300℃, (b) 400℃, (c) 500℃20
그림	3-11	Ar/O2 분압비에 따른 WInZnO 박막의 열처리 온도에
		따른 AFM 측정 결과(Ar:O ₂ =30:3 sccm)

그림 3-12 Ar/O₂ 분압비에 따른 YInZnO 박막의 SEM 결과, 각각 다음의 O₂ 분압비에 따라 박막이 형성되었음

(a) Ar:O₂=25:0 sccm, (b) Ar:O₂=24.5:0.5 sccm,

(c) $Ar:O_2=24:1$ sccm, (d) $Ar:O_2=23.5:1.5$ sccm,

(e) Ar:O₂=23:2 sccm, (f) Ar:O₂=22.5:2.5 sccm,

(a) Ar:O₂=25:0 sccm, (b) Ar:O₂=24.5:0.5 sccm,

(c) $Ar:O_2=24:1$ sccm, (d) $Ar:O_2=23:2$ sccm,

그림 3-18 Ar/O₂ 분압비에 따른 TaInZnO 박막의 표면 거칠기 …………… 29 그림 3-19 SiO₂/Si 기판 위에 증착된 Ar/O₂ 분압비에 따른

(a) TaInZnO 박막의 XRD 결과와 (b) 박막 형성 전

그림 3-20 산화물 박막 트랜지스터의 전기적 특성(I-V)을 평가하기

- 그림 3-23 Ar:O₂=24:1 sccm의 조건에서 증착된 YInZnO 채널층을 이용한 산화물 박막 트랜지스터의 게이트 전압에 따른

ABSTRACT

A study of electrical performance of InZnO based transparent oxide transistor

Lee, Young-Jun

Advisor : Prof. Kim Joo-Hyung, Ph.D. Department of Electronic Engineering, Graduate School of Chosun University

Thin film transistors (TFTs) for flat panel display using transparent oxide semiconductors (TOS) have much attentions due to high reliability, mobility as well as excellent transparency. It is reported that the stability of transparent oxide TFT is superior to that of *a*-Si based TFT and overall uniformity is better than low temperature poly silicon (LTPS) TFT, which can keep an amorphous phase. In other to improve the TFT device performance, several oxide semiconductors as an active channel layer, such as In-Ga-Zn-O, In-Zn-O, Zn-In-Sn-O, Zn-Sn-O, and In-Al-Zn-O have been usually suggested. Suppression of the charge carrier in semiconducting oxide ($<\sim 10^{18}$ cm⁻³) in other to improve the stability of TFTs by binding with oxygen group III and IV elements (e.g., Ga, Y, Si, Sn, Ti, Zr and Hf) are considered to control. Due to several advantages *i.e.*, good conductivity, high optical transparency and low deposition temperature, Indium-Zinc oxide (IZO) based oxide was selected for an active layer candidate material for high performance semiconducting and electrode layers in TFT. Also, to investigate the doping effect, we selected tungsten oxide (WO₃), yttrium oxide (Y₂O₃) and tantalum oxide (Ta₂O₅) materials to control the carrier concentration of

proerties of IZO based films. To evaluate WInZnO, YInZnO and TaInZnO films as a semiconducting channel layer, the device performance of TFTs were characterized.

IZO film and studied the effect of Ar/O₂ gas ratio on structural, electrical and optical

KEYWORDS : Oxide thin film transistor, Tungsten oxide, Yttrium oxide, Tantalum oxide, Indium zinc oxide, combinatorial sputtering

제1장 서론

최근 투명 Light Emitting Diode (LED), 대화면 TV 등과 같이 투명 기반의 전자 시 대가 도래한 만큼 투명 전자재료 분야에서 산화물 소재에 대한 관심이 급증하고 있다. 오래전부터 산화물 재료에 대한 연구가 이루어져 왔지만 미래 대화면, 고화질의 디스 플레이 및 태양전지에 적용 할 수 있는 투명 전극, 디스플레이용 박막 트랜지스터, LED 등에 적용 가능한 특성을 보임으로써 그 가능성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이렇게 투명하고 플렉서블한 디스플레이에 적합한 디스플레이용 백플레인은 최 근 산화물 반도체 기반의 산화물 박막 트랜지스터가 우수한 특성을 보여주기 시작하면 서 기존의 실리콘 기반 소자의 대체 가능성이 대두되었다.

근래에 박막 트랜지스터는 크게 비정질 실리콘, 저온 폴리 실리콘, 고온 폴리실리콘, 유기 박막 그리고 산화물 박막트랜지스터로 구분된다. 비정질 실리콘 박막 트랜지스터 는 제조 방법이 간단하고 공정온도가 낮아 Thin Film Transistor 기반 Liquid Crystal Display (TFT-LCD)에 적용이 되고 있다. 저온 폴리 실리콘 기술은 대면적 유리 기판 을 사용할 수 있는 라인의 구축이 가능하고, 최근 저전력 고품질의 차세대 디스플레이 소자로 각광받는 유기발광소자인 Active matrix organic LED (AMOLED) 시장의 급 속한 확대가 기대됨에 따라 그 중요성도 높아질 것으로 판단된다. 고온 폴리 실리콘 기술은 열처리 온도가 높아 통상의 유리 기판은 사용할 수 없고 고가의 석영(Quartz) 기판을 사용해야 하는 단점이 있으며, 대면적 기판의 사용이 불가능하다. 이는 프로젝 션 TV용 LCD에 주로 사용되고 있다. 유기박막 트랜지스터는 유기물을 사용하여 저온 공정으로 이루어지므로 필름 위에 공정이 가능하고 인쇄법의 적용이 쉬워 많이 연구가 되고 있다. 유기박막 트랜지스터는 증착법이나 용액에 의한 인쇄법 두 가지로 연구가 되고 있으며 재현성이나 안정성 등이 해결이 되어야 할 기술적 과제이다. 산화물 트랜 지스터는 이동도가 크고 투명하여 투명 디스플레이를 구현할 수 있다. 이에 따라 대면 적 균일도와 전류신뢰성을 동시에 만족할 수 있는 산화물 트랜지스터를 적용한 AMOLED 투명 디스플레이가 개발 발표되었으며 차세대 중대형 AMOLED 적용 가능 성을 높이고 있다 [1].

	<i>a</i> -Si TFT	Poly-Si TFT	Oxide TFT
Generation of glass	8 th G	4 th G	8 th G
Channel layer	amorphous Si ploycrystalline S		Amorphous InGaZnO
Uniformity	Good	Poor	Good
Mobility	1 cm²/Vs	$\sim 100 \text{ cm}^2/\text{Vs}$	>10 cm²/Vs
Transparency (%)	<20	<20	>80
Cost	Low	High	Low
Stability (10 ⁵ hr)	$ riangle V_{th} > 5 \ V$	$ riangle V_{th}$ $<$ 0.5 V	$\bigtriangleup V_{th} < 1~V$

표 1-1 산화물 박막 트랜지스터와 기존의 투명 트랜지스터의 특성 비교 [2]

위 표 1-1 은 비정질 실리콘, 폴리 실리콘 및 산화물 박막 트랜지스터의 장단점을 비 교하였다[2]. 박막 트랜지스터 소자 특성 중 대표적인 파라미터인 이동도의 경우 비정 질 실리콘 박막 트랜지스터에 비해 10배 이상 우수한 수준을 가지고 있고 투명 트랜지 스터에 적합한 80% 이상의 투과도를 가지면서 안정도도 높아 다른 박막 트랜지스터와 비교하여 좋은 특성을 가지고 있다. 또한 산화물 박막 트랜지스터가 폴리 실리콘 박막 트랜지스터 대비 제조 원가 경쟁력이 뛰어나 8세대 이상의 대형 라인에 적용될 수 있 다. 따라서 산화물 박막 트랜지스터는 여러 유형의 소자 특성의 고유한 장점을 동시에 보유하고 있음을 알 수 있다.

투명 산화물 반도체는 기존의 Si, GaAs와 같은 불투명한 반도체를 기반으로 한 일 반적 전자소자와는 달리, 광학적으로 투명하며, 전기적 특성을 지닌 투명 전자소자로서 의, 투명성과 구부릴 수 있는 장점을 가지고 있으므로, 솔라셀, OLED/LCD 디스플레 이, 투명 센서, 투명 RFID 태그, 투명 전자보안기기, 스마트 윈도우, 두루마리 형 디스 플레이, 시스템 일체형 스마트 디스플레이 등에 응용될 수 있다. 2003년에 ZnO 박막을 고온에서 적절히 열처리하면 반도체 소자의 채널로서의 특성을 보이는 결과를 미국 Oregon 대학의 Wager 교수 그룹에 의해 발표되었다[3]. 이후 일본 동경공대의 Hosono 교수 연구팀에서 InGaO₃(ZnO)₅ 결정을 이용하여 이동도가 우수한 투명한 반 도체소자를 제작 발표하였고, 이를 계기로 전 세계적으로 산화물반도체소자 제작에 대 한 연구가 활발히 진행되었다. 지금까지 연구된 투명 반도체 채널 재료는 ZnO, In₂O₃, InZnO [4], ZnSnO [5-7], InGaZnO [8-10], ZnGaSnO [11], HfInZnO [12], SiInZnO [13] 등과 같이 매우 다양하며, 현재 신규물질 개발에 연구가 집중되고 있다. 따라서 투명 반도체 제조를 위한 핵심 소재의 경우 일본 의존도가 크고, 채널층 물질 및 공정 에 대한 원천 특허를 일본이 대부분 소유하고 있어 이를 회피할 수 있는 신소재 개발 에 대한 필요성 대두되고 있다. 이러한 투명 디스플레이 적용을 위해서는 전기전도도 와 투명도 그리고 재료적인 특성을 제어하는 것이 필요하나, 현재까지 개발된 Indium-Tin-Oxide (ITO)의 경우 그 한계성을 가지고 있으므로 이를 대체하려는 물질 로 Indium-Zinc-Oxide (IZO)기반의 물질에 재료적인 도핑을 통하여 전자재료로서의 특성을 이해하고자 한다. 산화물 반도체에 응용 가능한 물질의 특성을 분석하기 위하 여 IZO 기반의 산화물에 WO₃, Ta₂O₅, Y₂O₃등의 물질을 도핑함으로 전기적인 특성, 광 학적 특성을 분석하고 이를 근거로 산화물 박막 트랜지스터를 제작하여 그 특성을 분 비교하고자 하였다. 이를 위하여 스퍼터링 방법을 이용하여 두 개의 서로 다른 반도체 재료를 co-sputtering 방법으로 투명 소재와 실리콘 기판 위에 형성하여 그 특성 을 파악하고 반도체 공정을 통하여 트랜지스터를 제작함으로 *I-V* 특성 및 도핑효과에 따른 투명 InZnO 기반 반도체의 특성 및 디바이스의 구동 특성을 연구하고자 하였다.

제2장 본 론

제1절 산화물 박막 트랜지스터 (Oxide Thin Film Transistor)

1. 산화물 박막 트랜지스터의 개요

투명 산화물 반도체 물질은 전계효과 트랜지스터의 채널층으로 사용되고 있는 비정질 실리콘(Amorphous Silicon, *a*-Si) 또는 폴리실리콘(Poly-Si)을 이용하는 반도체 공정 을 대체할 수 있을 것으로 기대를 모으고 있으며, 산화물 반도체를 이용한 LCD와 OLED 등의 능동구동소자 (Active Matrix 구동방식)의 제조에 많은 관심이 집중되고 있다.



그림 2-1 산화물 반도체 개발 초기 주역들 [14]

이런 산화물 반도체는 그림 2-1에서 볼 수 있듯이 2003년도에 본격적으로 시작되어 일본 동경공대(Tokvo Insitute of Technology)의 히데오 호소노(Hideo Hosono) 그룹 에서 발표한 비정질 산화물 박막 트랜지스터(a-InGaZnO)[15]와 미국의 Wager 그룹의 ZTO (Zinc Tin Oxide) 소재, 포르투칼의 Fortunato 그룹의 IZO를 시작으로 2005년 이 후 세계 유수의 그룹에서 연구를 진행하였다[16-17]. 타이완의 Hsieh 그룹에서는 TFT 채널의 폭/길이비 (W/L Ratio)에 의한 특성변화에 대한 결과를 보고 하였고 ZnO의 두 께를 조절하여 비정질 구조의 ZnO를 채널층으로 이용하 연구결과도 발표되었다 [18-19]. 이렇듯 초창기에는 ZnO 기반의 연구개발이 활발하였으나 최근 발표된 논문을 관찰하면 IZO를 기반으로 하여 제 3의 원소를 첨가시키면서 연구한 논문이 전체의 절 반을 차지하고 다음으로 ZnO, ZTO, ITO 등이 뒤를 이어가고 있다. IZO 기반의 박막 은 높은 이동도와 같이 좋은 전기적 특성[20]과 투명 전자소재에 적합한 80% 이상의 투과 특성[21]을 가지고 있고 저온 공정[22]으로 플라스틱 기판에도 사용이 가능하여 차세대 플렉서블 디스플레이에 적합한 장점을 가지고 있다. 이처럼 최근 저온 증착 특 성 및 높은 투과도를 가지며 대면적화에 적합하 IZO 기반에 도핑물질을 이용하 연구 가 주를 이루고 있으며 본 연구에서 IZO 기반에 도핑물질을 이용하여 연구를 진행하 였다. 이러한 산화물 반도체 재료를 이용한 박막 트랜지스터에 대해 한국에서는 2006 년부터 삼성 모바일 디스플레이 (SMD), LG 디스플레이 (LGD), 한국전자통신연구소 (ETRI) 등을 중심으로 연구 개발이 진행되어 오고 있고 후발주자로 대만 및 중국의 성장세가 두드러지고 있다.



그림 2-2 투명전자시대의 도래 [13]

2010년부터는 LGD, 삼성전자가 관련 핵심기술 및 공정특허를 다수 취득하고 있고 한 국 외에 일본의 샤프, 소니, 파나소닉과 대만의 AUO 패널 업체들의 향후 시장 진입도 가속화되었다. 2012년 하반기부터 기존의 비정질 실리콘 LCD 라인을 산화물 반도체 LCD 라인으로 개조 투가 및 신규 투자가 진행되고 있어 스마트 폰, 태블릿 PC 및 TV까지 적용 제품의 확대가 기대된다. 이렇게 그림 2-2와 같이 투명 전자 시대에 맞 추어 국내외에서 산화물 반도체에 대한 산업계의 연구 개발이 활발히 이루어지고 있 다.

2. 산화물 박막 트랜지스터의 구조 및 특성

투명 산화물 반도체의 구조는 기존의 반도체의 구조를 기반으로 만들어졌다. 개발 과 정에서 다양한 구조가 시도되었고 각각의 구조는 장단점을 가지지만 a-Si TFT 구조 를 산업체에서 선호함에 따라 그 구조를 기반으로 연구가 많이 이루어졌다. 하지만 박 막 자체의 특성을 주로 평가하거나 별도의 공정을 개발하지 않는 경우에는 유기 TFT 와 유사한 구조를 가지거나 산화물 반도체를 증착한 후 그 상부에 패턴 마스크를 사용 하여 소스 드레인 전극을 형성하기도 한다. 산화물 반도체는 일반적으로 기판과 게이 트, 게이트 절연층, 채널층 그리고 소스 드레인 전극으로 구성되어 있는데 아직까지는 별도의 도핑층 없이 직접 전극과 산화물 반도체가 접촉되는 형태를 가지는 것이 일반 적이다. 이러한 산화물 박막 트랜지스터의 특성을 개선하기 위해서는 그림 2-3처럼 TFT 구조와 게이트 절연막, 전극 접촉 저항 등의 모든 요소를 고려하여야 하지만 채 널층의 특성에 따라 소자특성이 크게 변화한다.



그림 2-3 일반적인 Oxide 기반 TFT의 구조

따라서 본 연구에서는 여러 조건에서 캐리어 농도를 조절하여 새로운 채널층을 적용하 고 금속 마스크를 이용하여 산화물 반도체층과 전극이 직접 접촉되는 구조로 채널층 박막의 특성 및 제작된 산화물 반도체의 소자 특성을 연구하였다.

또한 최근 여러 분야에서 투명한 디바이스가 주목받으면서 이에 적용할 수 있는 투명 한 소재에 대한 관심과 연구가 활발히 진행되고 있고 산화물 반도체 기반의 산화물 박 막 트랜지스터가 우수한 특성으로 주목 받기 시작하였다. 투명 산화물 반도체 기술은 기존의 Si 기반의 소자와 비교해 보았을 때 여러 가지 이점을 가지고 있다. 첫 번째 이점으로 광학적 측면에서 산화물 반도체는 투명한 박막을 형성할 수 있다. 산화물 반 도체와 비교되는 기존의 Si나 GaAs 같은 반도체는 각각 1.2 eV와 1.43 eV의 밴드갭을 가지고 있는데 밴드갭 이상의 에너지를 가지고 있는 가시광이 비춰지면 가전자대 (Valence band)의 전자가 전도대(Conduction band)로 여기 되는 현상되는 빛 에너지가 손실되고 이로 인해 투과되는 및 에너지가 줄어들게 된다. 이에 비해 ZnO나 Ga₂O₃, In₂O₃, SnO₂ 같은 산화물 반도체는 약 3.1 eV 이상의 넓은 밴드갭을 가지고 있어 가시 광의 흡수가 일어나지 않고 투과되어 투명한 디스플레이 소자로 이용이 가능하다. 둘 째로 전기, 전자적 측면에서 보면 산화물 반도체는 높은 이동도(High carrier mobility, 1-100 cm²/Vs)를 가지고 있어 전기적 성능 또한 우수하다는 특징을 가지고 있다[21]. 이에 따라 본 연구에서는 그림 2-4에서 볼 수 있듯이 높은 밴드갭을 가지고 있는 Y₂O₃와 Ta₂O₅ 등을 InZnO에 도핑하여 재료적인 특성과 TFT 디바이스 특성에 대한 연구를 진행하였다.

산화물 반도체 제조 공법은 크게 진공방식과 비진공 방식으로 크게 구분되며 진공방식 중에 Sputtering 방법이 대부분을 차지하고 있고 최근 고품질 및 저온화를 주도하고 있다. 비진공 방식은 저가 공정으로 졸겔 기반의 솔루션, 스프레이, 잉크젯 기반 프린 팅 등 방법이 있으나 Solution 공정 기반의 산화물 박막 트랜지스터 기술이 큰 비중을 하지하고 있다. 하지만 전기적인 신뢰성 및 공정 온도 등에서 아직은 진공방식에 의한 박막 트랜지스터 특성을 따라오지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 채널층 물질의 증착에 적합한 Sputtering 방식을 사용하였다.



그림 2-4 게이트 산화물의 유전 상수(dielectric constant) 대 밴드갭(Band Gap) 그래프 [24]

제3장 실험, 결과 및 고찰

제1절 InZnO 기반 산화물 박막 및 트랜지스터의 제조를 위한 기판의 준비

본 연구에서는 박막의 전기적, 광학적 그리고 구조적인 특성을 관찰하기위해 상온에 서 InZnO 기반의 산화물 박막을 유리 기판에 증착하였고 이를 채널층으로 이용한 박 막 트랜지스터의 제조를 위해 다시 실리콘 산화막이 형성된 실리콘 웨이퍼를 기판으로 사용하였다. 사용된 유리 기판과 실리콘 기판은 화학 공정실에서 모두 습식 공정을 통 해 유무기 불순물을 제거하기 위한 공정을 진행하였다. Soap bath 용액에 담가 1800초 동안 1회 초음파 세척 후 310초 동안 2회에 걸쳐 린스과정을 실시하였다. 이후 수분 을 제거하기 위해 100℃의 온도를 유지하고 있는 오븐에서 약 5분간 열처리를 하여 건 조 시킨 후 기판으로 사용하였다.



그림 3-1 기판 전처리에 사용된 (a) 습식공정 (cleaning wet station)과 (b) 건조 용 오븐.

제2절 InZnO 산화물 박막 및 이를 채널층으로 이용한 박막 트랜지스터의 제조

박막 형성에 사용된 증착 장비는 RF magnetron co-sputtering (ULVAC MB07-4501)을 이용하여 상온에서 증착하였으며 증착 장비의 챔버 구조를 그림 3-2에 나타내었다.



그림 3-2 박막 중착에 사용된 RF Magnetron co-sputtering의 사진(왼쪽)과 공정 챔버의 내부 구조(오른쪽)

공정 챔버는 4 inch 타겟을 독립적으로 구동할 수 있는 4개의 sputtering gun 과 중 앙에는 공정을 진행하기 위한 다양한 가스를 공급해주는 가스 라인이 위치하여 있고, 기판은 챔버 내의 상부에 기판 홀더를 이용하여 고정하였다. 박막 증착 전에 로터리 펌프와 터보 펌프를 사용하여 챔버 내부 압력을 5 × 10⁻⁶ Pa 이하까지 배기한 후, 상 온에서 박막 증착을 진행하였다. 챔버 내 가스로 사용되는 아르곤(Ar) 가스와 산소 (O₂) 가스는 질량유량계 (Mass flow controller)를 통해 일정한 양과 비율로 챔버 내에 유입시켰다. 본 연구에서는 아래 표 3-1 와 같이 박막을 크게 3가지로 분류하여 실험 을 진행하였다.

	WInZnO	YInZnO
공저 저 아려		

¥ 3-1 Experimental parameters

공정 전 압력 (Pa)	$< 5 \times 10^{-6}$	$< 5 \times 10^{-6}$	$< 5 \times 10^{-6}$			
공정 압력 (Pa)	$0.21 \sim 0.27$	0.17	0.17			
공정 가스	Ar, O ₂ (Ar fixed 30 sccm)	Ar, O ₂ (total 25 sccm)	Ar, O ₂ (total 25 sccm)			
공정 조건 수	6	7	5			
두께 (nm)	~ 30 nm	53 ~ 93 nm	~ 25 nm			
타겟	InZnO (Zn doped In ₂ O ₃ 90 wt. %)	InZnO (Zn doped In ₂ O ₃ 50 wt. %)				
	WO_3	Y_2O_3	Ta_2O_5			
DT 츠러	200 W (for InZnO)	150 W (for InZnO)	150 W (for InZnO)			
Nr z 4	100W (for WO_3)	$100W$ (for Y_2O_3)	$100W$ (for Ta_2O_5)			
타겟-기판 간 거리 (mm)	150					
공정 온도 (℃)	R. T. (~25℃)					

TaInZnO

<WInZnO 박막>

먼저 InZnO에 WO₃을 도핑한 WInZnO 박막은 Y₂O₃ 타겟과 InZnO (Zn doped In₂O₃ 90 wt. %) 타겟을 사용하였고 증착 시간을 조절하여 Ar과 O₂ 가스의 비율을 조절하여 세정된 유리 기판에 약 30 nm의 두께로 박막을 형성하였다. 공정 가스는 Ar 가스를 30 sccm으로 고정하고 O₂ 가스를 0, 1, 3, 5, 7, 10 sccm의 6가지 조건하에서 WInZnO 박막을 형성하였다.

<YInZnO 박막>

두 번째 실험인 InZnO에 Y₂O₃를 도핑한 YInZnO 박막은 WInZnO 박막에 사용한 타겟 과 다른 비율인 InZnO (Zn doped In₂O₃ 50 wt. %) 타겟과 Y₂O₃ 타겟을 사용하여 박 막을 형성 하였다. YInZnO 박막은 공정 가스인 Ar과 O₂의 합이 25 sccm, 공정 압력 은 0.17 Pa로 일정하게 유지하면서 Ar 가스와 O₂ 가스의 비율을 7가지 조건 (Ar:O₂=25:1, 24.5:0.5, 24:1, 23.5:1.5, 23:2, 22.5:2.5, 22:3 sccm)으로 조절하였다. 따라서 가스 분압비에 따른 박막의 두께가 약 93 nm ~ 53 nm로 O₂의 양이 증가함에 따라 박막의 두께가 감소하는 경향을 보였다.

<TaInZnO 박막>

TaInZnO 박막은 YInZnO 박막에 사용한 주 타겟인 InZnO (Zn doped In₂O₃ 50 wt. %) 타겟과 Ta₂O₅ 타겟을 사용하여 상온에서 유리 기판에 박막을 증착하였다. 공정 가 스는 YInZnO 박막의 공정 가스량과 마찬가지로 Ar과 O₂의 양을 전체 25 sccm으로 고정하고 Ar/O₂ 분압비를 조절하여 600초 동안 5가지 조건(Ar:O₂=25:0, 24.5:0.5, 24:1, 23:2 그리고 22:3 sccm)으로 증착하였다.

<박막 트랜지스터 제작>

형성된 각각의 박막은 다시 실리콘 산화막이 형성된 실리콘 웨이퍼에 채널층으로 증착 되고 WInZnO와 YInZnO 박막을 채널층으로 사용한 소자는 e-beam 증착기를 이용하 여 소스와 드레인으로 Ti/Au를 100 nm/30 nm 증착하였다. TaInZnO의 경우는 박막을 형성한 동일 장비로 마스크를 이용하여 상온에서 소스 드레인 메탈층 형성을 위해 Ar 가스 25 sccm을 유지하면서 탄탈륨을 RF power 100W로 1800초간 증착하였다. 본 실 험에서의 다양한 도핑에 따른 InZnO 박막 기반의 구조에 대해 모든 박막 트랜지스터 는 같은 구조를 가지며, 아래 그림 3-3에서는 TaInZnO 박막을 채널층으로 적용한 트 랜지스터의 구조를 보여주고 있다.



그림 3-3 TaInZnO 박막을 채널층으로 이용한 박막 트랜지스터의 소자 구조

제3절 가스 분압비에 따른 InZnO 기반 산화물 박막의 특성 평가

증착된 박막의 결정 구조는 X-ray Diffraction(XRD, PANalytical X'pert-PRO MPD)를 사용하여 분석하였고, 광학적 특성은 상온에서 UV-Vis-NIR spectrometer(Varian, Cary 5000)를 이용하여 투과도를 측정했고, 증착 전 유리 기판을 측정하여 비교 분석 하였다. 박막 표면 구조와 두께 그리고 표면 거칠기는 각각 Scanning electron microscope(SEM, FEI Quanta 200 FEG)와 Atomic force microscopy(AFM, PSIA XE-200)를 이용하였고, 박막의 전기적 특성은 상온에서 Van de Pauw 방법을 이용한 Hall measurement (LakeShore, Cryotronics 7707_LVWR)와 4침법 (4-Point probe)을 이용하여 분석하였다. 그림 3-4는 박막의 특성 평가에 사용된 장비를 나타내었다.



- 그림 3-4 박막 분석에 사용된 분석 장비
 - (a) AFM, (b) 4-point probe, (c) FE-SEM, (d) HR-XRD and (e) UV-Vis-NIR spectrometer.

1. 텅스텐 도핑에 따른 InZnO 산화물 (WInZnO) 박막의 특성 평가

가. 박막의 전기적, 광학적 특성 관찰

O₂의 양에 따른 SEM 측정 결과로 아래에 표면 이미지를 나타내었다. 육안으로는 그림에서 샘플의 큰 차이를 알아보기가 어렵다. 이는 WInZnO 박막의 증착이 매우 부 드럽고 좋은 표면 상태의 비정질 구조를 보이고 있기 때문이다. SEM 측정 결과로 WInZnO 박막이 약 30 nm의 두께로 증착되었음을 관찰할 수 있었다.



그림 3-5 O₂의 양에 따른 WInZnO 박막의 표면 이미지, 각각 다음의 O₂ 분압 비에 따라 박막이 형성되었음 (a) O₂=0 sccm, (b) O₂=1 sccm, (c) O₂=3 sccm, (d) O₂=5 sccm, (e) O₂=7 sccm, (f) O₂=10 sccm

보다 자세한 박막의 결정구조를 관찰하기 위해 다음 그림에 WInZnO 박막의 O₂의 양 에 따른 XRD 결과를 나타내었다.



그림 3-6 Ar/O2 분압비에 따른 WInZnO 박막의 XRD 측정 결과

위 그림에서 볼 수 있듯이 Ar/O₂ 분압비에 따른 모든 WInZnO 박막은 비정질 (amorphous) 구조를 보이고 있다. 이는 WInZnO 박막 형성 시에 순수 Ar 가스 상태의 공정 분위기에서부터 O₂ 가스가 동시에 주입되는 모든 공정 조건에서, sputtering으로 제작된 WInZnO 박막은 공정가스의 조건에 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있었다.



그림 3-7 Ar/O2 분압비에 따른 WInZnO 박막의 AFM 측정 결과

AFM을 통해 WInZnO 박막의 거칠기를 측정한 결과를 위 그림에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 모든 WInZnO 박막의 표면 거칠기는 0.5 nm 이하로 아주 부드러운 박막 표면 상태를 얻을 수 있었다.

표	3 - 2	O_2	가스량에	따른	WInZnO	박막의	전기적	특성	측정	결과
---	-------	-------	------	----	--------	-----	-----	----	----	----

O ₂ (sccm)	0	1	3	5	7	10
Resistivity ($\Omega \cdot cm$)	1.50×10^{-3}	8.17×10^{-2}	8.40	_	1.01	_
Carrier density (×10 ¹⁶ cm ⁻³)	2.67×10^4	25.4	9.39	_	2.73×10^2	_
Mobility (cm ² /Vs)	15	300	7.9	_	2.3	_
R _s (Ω/□)	493.3	4.069×10^{6}	_	_	_	_

표 3-2는 형성된 WInZnO 박막의 O₂의 양에 따른 Hall 효과 측정 및 면저항 측정 결 과이다. O₂의 양이 증가함에 따라 비저항이 증가하여 캐리어 농도가 감소하는 경향을 보이고 있고 이는 약간의 O₂량 증가가 채널층에 적합한 박막의 조건을 형성하게 됨을 알 수 있다.



그림 3-8 Ar/O₂ 분압비에 따른 WInZnO 박막의 투과도 측정 결과

투명 산화물 반도체에서 최근 이슈가 되고 있는 WInZnO의 광학적 특성에 대해서 관찰하였다. 위 그림에서 볼 수 있듯이 O₂의 양에 따른 박막의 투과도는 모두 가시영 역에서 유리 기판 대비 89% 이상의 높은 투과도를 보이고 있다. 이는 투명 산화물 반 도체의 소자로 광학적 특성에서 높은 가능성을 보여주는 결과이다.

나. 온도별 열처리 (Annealing) 후 특성 변화 관찰

형성된 박막의 열처리 특성을 알아보기 위하여 진공 튜브에서 MFC를 통해 O₂가스 20 sccm을 주입하고 200 ℃부터 500 ℃까지 100 ℃도 간격으로 4가지 조건의 온도에 서 1시간 동안 후열처리(post annealing)를 실시하였다.



그림 3-9 Ar/O₂ 분압비에 따른 WInZnO 박막의 200 ℃ 에서 후열처리 후 XRD 결과

그림 3-9는 200 ℃ 후열처리 후 XRD 측정 결과이다. 열처리 온도 200 ℃에서는 열처 리 전 박막의 XRD 결과와 큰 차이가 없이 비정질 구조를 보이고 있다. 따라서 WInZnO 박막은 200 ℃의 열처리 온도에서 박막의 결정구조에 큰 영향을 받지 않는 것을 확인 하였다.





그림 3-10 Ar/O₂ 분압비에 따른 WInZnO 박막의 후열처리 후 XRD 결과. 후열처리온도: (a) 300 ℃, (b) 400 ℃, (c) 500 ℃.

위 그림 3-10는 Ar/O₂ 분압비에 따른 WInZnO 박막의 300 ℃에서 500 ℃까지의 후열 처리 온도에 따른 XRD 변화를 보여주고 있다. 열처리 온도가 300℃이상에서는 몇몇 조건에서 결정성이 관찰되고 있다. 300 ℃에서 500 ℃까지의 온도에서 모두 동일하게 O₂=3 sccm 이상의 샘플에서만 결정성을 보이고 있다. 다시 말해 Ar/O₂ 가스 분압비 10% 이상의 샘플이 2*θ* ~ 30.6° 근처에서 결정성을 보이고 있고 JCPDS(Joint Committe on Powder Diffraction Standards) 카드 및 여러 문헌에서 In₂O₃ (222)로 확 인되었다 [25]. 이는 사용된 주 타겟의 In₂O₃ 비중이 높은데다가 열처리가 진행되면서 박막의 결정구조가 형성된 것으로 보인다.



그림 3-11 Ar/O₂ 분압비에 따른 WInZnO 박막의 열처리 온도에 따른 AFM 측정 결과(Ar:O₂=30:3 sccm)

열처리 온도에 따른 WInZnO 박막의 표면 거칠기 변화는 그림 3-11에서 O₂=3 sccm을 대표적으로 보여주고 있다. 열처리 전의 거칠기 (*R*_a<0.5 nm)보다 열처리 온도가 높을 수록 전체적으로 다소 증가하는 경향을 보이나 200 ℃이상의 박막의 표면 거칠기에서 는 큰 차이가 없는 것을 볼 수 있다. 따라서 열처리 온도가 증가하여도 박막의 표면 거칠기는 감소하거나 증가하는 등의 큰 차이를 보이지 않고 부드러운 표면 상태를 보 이고 있다.

 O_2 (sccm) 0 3 5 7 10 1 Resistivity 2.63 3.36 5.15 2.10 1.71 2.50 $(\times 10^{-2}, \Omega \cdot cm)$ Carrier density 1.08 1.23 1.521.75 1.771.42 $(\times 10^{19}, \text{ cm}^{-3})$ Mobility 22 15 8 17 20.6 17 (cm^2/Vs) Rs (×10³, Ω/\Box) 8.33 11.79 12.83 4.83 4.74 6.88

표 3-3 O₂ 가스량에 따른 WInZnO 박막의 200 ℃ 열처리 후 전기적 특성 측정 결과 (300 ℃ 이상 측정 불가)

열처리 온도가 변화함에 따라 WInZnO 박막의 전기적 특성도 변화하였다. 위 표에서 볼 수 있듯이 열처리 온도가 200 ℃일 때 박막이 모두 비슷한 특성을 보이다가 열처리 온도가 증가함에 따라 급격한 비저항 및 면저항의 증가와 캐리어 농도의 감소를 보이 고 있다. 2. 이트륨 도핑에 따른 InZnO 산화물 (YInZnO) 박막의 특성 평가



그림 3-12 Ar/O₂ 분압비에 따른 YInZnO 박막의 SEM 결과, 각각 다음의 O₂ 분 압비에 따라 박막이 형성되었음

(a) $Ar:O_2=25:0$ sccm, (b) $Ar:O_2=24.5:0.5$ sccm, (c) $Ar:O_2=24:1$ sccm, (d) $Ar:O_2=23.5:1.5$ sccm, (e) $Ar:O_2=23:2$ sccm, (f) $Ar:O_2=22.5:2.5$ sccm, (g) $Ar:O_2=22:3$ sccm

그림 3-12는 Ar/O₂ 분압비에 따른 YInZnO 박막의 표면을 관찰한 결과이다. 각 박막 의 표면 상태는 가스 분압비에 따라 크게 차이를 보이고 있지는 않지만 O₂의 양이 증 가하면서 박막 증착시 O₂ 가스가 박막의 표면 거칠기를 감소시키는 것으로 생각된다.



그림 3-13 Ar/O2 분압비에 따른 YInZnO 박막의 XRD 결과

더 자세한 결정구조를 관찰하기 위하여 그림 3-13에 Ar/O₂ 분압비에 따른 YInZnO 박 막의 XRD 분석 결과를 나타내었다. YInZnO 박막은 공정 가스가 순수 Ar 상태일 때 비정질 구조를 보이다가 O₂가스를 0.5 sccm 이상의 조건에서 제작된 샘플부터 약 20 ~ 31.7°의 피크가 관찰되는데 여러 논문을 통해 이는 ZnO (100) 피크로 확인되었다 [25]. 이는 주 타겟인 InZnO의 성분비가 WInZnO 박막에 사용된 InZnO 타겟의 성분비 가 달라 Zn가 In보다 먼저 결정성을 이루게 된 것으로 인한 결과라고 여길 수 있다.



그림 3-14 Ar/O2 분압비에 따른 YInZnO 박막의 표면 거칠기

태핑모드 (Tapping mode)의 AFM을 통해 YInZnO 박막의 표면 특성을 관찰한 결과를 그림 3-14에 나타내었다. 결과에서 볼 수 있듯이 박막의 표면 거칠기는 평균 약 $R_a \sim$ 1.55 nm 이하로 비교적 부드러운 표면 상태를 보이고 있으며 이는 그림 3-12에서 나 타낸 SEM을 통한 표면 이미지와 같은 경향을 보이고 있다.



그림 3-15 Ar/O2 분압비에 따른 YInZnO 박막의 광학적 특성

그림 3-15에서는 YInZnO 박막의 Ar/O₂ 분압비에 따른 투과도을 나타내고 있다. 기존 의 InZnO 박막의 가시영역에서의 투과도[26] 보다 더 높은 84% 이상의 유리 기판 대 비 투과도을 보이고 있는 YInZnO 박막은 향후 투명 산화물 반도체로의 광학적 특성 에 적합한 조건을 보여 준다고 할 수 있다.



그림 3-16 Ar/O2 분압비에 따른 YInZnO 박막의 전기적 특성

YInZnO 박막의 전기적 특성을 알아보기 위해 Hall 효과 측정 장비를 이용하여 비저 항, 캐리어 농도 및 이동도를 분석하였고 이는 그림 3-16에 나타내었다. YInZnO 박막 의 전기적 특성은 Ar/O₂ 분압비에 큰 영향을 받았다. 순수한 Ar 가스 상태에서 형성 된 박막은 2.56 × 10⁻³ Ω·cm의 가장 낮은 비저항을 보이며 1.16 × 10²⁰ cm⁻³의 높은 캐 리어 농도와 21 cm²/Vs의 이동도를 보이고 있다. O₂의 양이 주입되어 증가 할수록 비 저항은 급격히 증가하고 반대로 캐리어 농도와 이동도는 감소하여 가장 낮은 3.57 × 10¹⁵ cm⁻³의 캐리어 농도와 9.1 cm²/Vs 이하의 이동도를 보이고 있다. 3. 탄탈륨 도핑에 따른 InZnO 산화물 (TaInZnO) 박막의 특성 평가



- 그림 3-17 Ar/O2 분압비에 따른 TaInZnO 박막의 SEM 결과
 - (a) Ar:O₂=25:0 sccm, (b) Ar:O₂=24.5:0.5 sccm, (c) Ar:O₂=24:1 sccm,
 (d) Ar:O₂=23:2 sccm, (e) Ar:O₂=22:3 sccm,

Ar/O₂ 분압비에 따른 TaInZnO 박막의 SEM을 이용한 표면 측정 이미지를 그림 3-17에 나타내었다. SEM의 단면 이미지를 통해 TaInZnO 박막의 두께는 약 25 nm 정도로 관찰되며 그림에서 볼 수 있듯이 샘플 표면 이미지에서 큰 차이를 보이지 않는 것으로 보아 모든 TaInZnO 박막의 증착이 매우 부드럽고 좋은 표면 상태의 비정질 구조를 보이는 것으로 나타났다.



그림 3-18 Ar/O2 분압비에 따른 TaInZnO 박막의 표면 거칠기

그림 3-18은 이전 YInZnO에서 볼 수 있듯이 AFM을 통해 관측된 TaInZnO 박막의 표면 거칠기가 매우 낮음을 볼 수 있다. Ar/O₂ 분압비가 변화하면서 박막의 표면 거칠 기는 약간 감소하는 경향을 보이고 있지만 모든 TaInZnO 박막은 약 *R_a*~0.2 nm 이하 로 매우 부드러운 표면 상태를 보이고 있다.



그림 3-19 SiO₂/Si 기판 위에 증착된 Ar/O₂ 분압비에 따른 (a) TaInZnO 박막의 XRD 측정 결과와 (b) 박막 형성 전 SiO₂/Si 기판의 XRD 측정 결과

그림 3-19는 SiO₂/Si을 기판으로 그 위에 TaInZnO 박막을 형성하고 XRD를 통해 결 정성을 관찰한 결과이다. 측정 결과 결정성이 검출 되었고 기판의 영향을 고려하여 박 막 증착 전의 기판에 대해 같은 조건에서 XRD를 측정하였다. 그 결과 TaInZnO 박막 을 형성한 후 관찰된 XRD 피크는 SiO₂/Si 기판의 피크가 검출되었던 것으로 판단된 다. 따라서 형성된 TaInZnO 박막 자체는 비정질 구조를 보이고 있음을 알 수 있었다.

제4절 가스 분압비에 따른 InZnO 기반 산화물 박막 트랜지스터의 특성 평가

실리콘 산화막이 형성된 실리콘 웨이퍼에 RF magnetron co-sputtering을 이용하여 박 막을 증착하고 이를 채널층으로 이용한 산화물 박막 트랜지스터의 특성을 평가하고자 하였다. 3장 3절에서 각각 다른 조건으로 박막을 형성하여 그 구조적, 전기적 및 광학 적 특성을 분석하였고 이 박막들을 채널층으로 이용한 산화물 박막 트랜지스터의 특성 을 평가하기 위하여 아래 그림과 같이 반도체 평가 장비 (Semiconductor parameter analyzer, Agilent 4155C)를 프로브 스테이션 (Probe station)에 연결하여 제작된 산화 물 박막 트랜지스터의 특성을 분석하였다.



그림 3-20 산화물 박막 트랜지스터의 전기적 특성(I-V)을 평가하기 위하여 사용된 반도체 평가 시스템 1. WInZnO 기반의 박막 트랜지스터 전류-전압 (I-V) 특성



그림 3-21 Ar:O₂=30:3 sccm의 조건에서 중착된 WInZnO 채널층을 이용한 산화물 박막 트랜지스터의 게이트 전압에 따른 V_{DS}-I_{DS} 특성

그림 3-21은 Ar 가스 30sccm, O₂ 가스 3 sccm에서 증착된 WInZnO 박막을 채널층으 로 이용한 박막 트랜지스터의 게이트 전압에 따른 V_{DS}-I_{DS} 특성을 보여주고 있다. 가 해주는 게이트 전압에 따라 트랜지스터의 소스와 드레인 사이에 측정된 V_{DS}에 대하여 바이어스 전압이 증가 할수록 낮은 게이트 전압에서는 드레인 전류 I_{DS}가 커다란 차이 를 보이지 않았다. 그러나 게이트 전압이 증가할수록 I_{DS}가 급격히 증가하는 것을 확 인할 수 있었다. 위 조건의 박막 외에 다른 샘플에서는 트랜지스터의 특성을 관찰하기 어려웠다.



그림 3-22 Ar:O₂=30:3 sccm의 조건에서 증착된 WInZnO 채널층을 이용한 산화물 박막 트랜지스터의 V_{GS}-I_{DS} 특성

위 그림은 가스 분압비 Ar:O₂=30:3 sccm에서 형성된 WInZnO 박막을 채널층으로 이 용한 트랜지스터의 V_{GS}-I_{DS} 특성으로 소자 분석 결과 문턱 전압은 3.4 V, Sub threshold swing(S.S)는 0.7 V/dec.를 보이나 I_{on/off}가 1.96 × 10⁴, μ_{sat}=0.3 cm²/Vs로 낮 은 특성을 보이고 있다. 2. YInZnO 기반의 박막 트랜지스터 전류-전압 (I-V) 특성



그림 3-23 Ar:O₂=24:1 sccm의 조건에서 중착된 YInZnO 채널층을 이용한 산화물 박막 트랜지스터의 게이트 전압에 따른 V_{DS}-I_{DS} 특성

그림 3-23은 Ar:O₂=24:1 sccm에서 증착된 YInZnO 박막을 채널층으로 이용한 박막 트 랜지스터의 V_{GS} - I_{DS} 특성을 나타내고 있다. 게이트 전압은 0 V에서 20 V까지 4 V의 간격으로 조절하였으며 게이트 전압 8 V 이하의 드레인 전류는 무시할 정도로 변화의 차이가 크게 보이지 않는다. 반면 게이트 전압 16 V와 20 V의 드레인 전류의 변화는 큰 차이를 보이고 있다.



그림 3-24 Ar:O₂=24:1 sccm의 조건에서 증착된 YInZnO 채널층을 이용한 산화물 박막 트랜지스터의 V_{GS}-I_{DS} 특성

위 그림은 가스 분압비 Ar:O₂=24:1 sccm에서 형성된 YInZnO 박막을 채널층으로 이용 한 트랜지스터의 V_{GS}-I_{DS} 특성으로 소자 분석 결과 상용화된 트랜지스터의 이동도보 다 낮은 µ_{sat}=7.5 cm²/Vs을 보이고 있고 앞의 그림에서 예상했듯이 문턱 전압은 17.6 V 로 매우 높은 값을 보이고 있다. S.S는 0.94 V/dec.의 값을 보이고 I_{on/off}가 3.45 × 10⁶ 로 비교적 좋은 특성을 보이고 있다. YInZnO 박막을 이용한 박막트랜지스터의 특성에 서 볼 수 있듯이 추가 실험을 통해 문턱 전압을 낮추고 이동도를 높인다면 향후 산화 물 반도체의 소재로서 충분한 가능성을 보이고 있다.

위의 조건 외에 또 다른 Ar/O₂ 분압비에 따른 YInZnO 박막 트랜지스터의 특성은 아 래 표 3-4에 나타내었다. O₂의 양이 증가 할수록 문턱전압이 급격히 증가하고 *I*_{on/off} 값 이 감소하는 것을 볼 수 있는데 이는 O₂의 양이 증가 할수록 트랜지스터의 조건에서 거리가 멀어지고 있어 적당한 Ar/O₂ 분압비가 필요함을 보여주고 있다.

Ar:O ₂ (sccm)	25:0	24:1	23:2	22:3
V _{th} (V)	_	17.6	30	33.2
S. S. (V/dec.)	_	0.94	3.27	4.66
$I_{\textit{on/off}}$ (×10 ⁴)	_	346	33.7	2.23

표 3-4 Ar/O2 가스 분압비에 따른 YInZnO 박막 트랜지스터의 특성

3. TaInZnO 기반의 박막 트랜지스터 전류-전압 (I-V) 특성



그림 3-25 Ar:O₂=22:3 sccm의 조건에서 증착된 TaInZnO 채널층을 이용한 산화 물 박막 트랜지스터의 게이트 전압에 따른 V_{DS}-I_{DS} 특성

그림 3-25는 Ar:O₂=22:3 sccm에서 증착된 TaInZnO 박막을 채널층으로 이용한 박막 트랜지스터의 V_{GS} - I_{DS} 특성을 나타내고 있다. 게이트 전압은 0V에서 20V까지 4V의 간격으로 조절하였으며 게이트 전압 6V 이하의 드레인 전류는 무시할 정도로 변화의 차이가 크게 보이지 않는다. 반면 게이트 전압 8V에서부터 20V의 드레인 전류의 변화 는 큰 차이를 보이고 있다.



그림 3-26 Ar:O₂=22:3 sccm의 조건에서 중착된 TaInZnO 채널층을 이용한 산화 물 박막 트랜지스터의 V_{GS}-I_{DS} 특성

위 그림은 가스 분압비 Ar:O₂=22:3 sccm에서 형성된 TaInZnO 박막을 채널층으로 이 용한 트랜지스터의 V_{GS}-I_{DS} 특성으로 소자 분석 결과 YInZnO 박막과 비슷한 이동도 인 µ_{sat}=7.6 cm²/Vs을 보이고 있지만 문턱전압은 4.8V로 비교적 낮은 값을 보이고 있 다. S.S는 0.94 V/dec.의 값을 보이고 I_{on/off}가 약 10⁶로 비교적 좋은 스위칭 특성을 보 이고 있다. TaInZnO 박막을 이용한 박막트랜지스터의 특성에서는 향후 이동도를 개선 한다면 산화물 반도체의 소재로서 충분한 가능성을 보일 수 있다.

대표적인 TaInZnO TFT 외에 또 다른 Ar/O₂ 분압비에 따른 TaInZnO 박막 트랜지스 터의 특성은 아래 표 3-5에 나타내었다. O₂ 분압비에 따라 트랜지스터의 특성 또한 각 각 변화하고 있다. *I_{on/of}를* 기준으로 Ar:O₂=23:2가 좋은 특성을 보일 수 있으나 문턱전 압과 이동도 등을 고려해볼 때 본 연구가 진행된 조건에서는 Ar:O₂=22:3 조건의 채널 층을 이용했을 때 가장 좋은 트랜지스터 특성을 보인다.

Ar: O_2 (sccm) 25:0 24.5:0.5 24:1 23:2 22:3 V_{th} (V) _ 4.1 8.9 9.3 4.8 S. S. (V/dec.)0.5 0.94 1.78 1.48 _ $I_{on/off}$ (×10⁴) 2.84×10 2.38 4.20×10^{2} 9.68×10 _ $\mu_{\rm sat} \, ({\rm cm}^2/{\rm Vs})$ 0.82 1.254.79 7.60 _

표 3-5 Ar/O2 가스 분압비에 따른 TaInZnO 박막 트랜지스터의 특성

제4장 결 론

산화물 반도체의 새로운 소재에 대한 연구가 활발히 진행되는 가운데 본 연구에서는 소자 특성이 우수한 InZnO에 WO₃, Y₂O₃, Ta₂O₅를 각각 여러 조건의 가스 분압비로 도핑하여 새로운 소재로서 그 가능성을 확인하고자 하였다. 전기적 및 구조적 특징을 관찰하여 형성된 박막이 산화물 박막 트랜지스터의 채널층 소자로서 적합한지를 확인 하고 광학적 특성을 관찰하여 향후 투명 산화물 재료로 그 가능성을 확인하였다. 트랜 지스터의 특성을 관찰하기 위해 실리콘 산화막이 형성된 웨이퍼 기판에 박막을 중착하 고 metal mask를 이용하여 소스 드레인을 증착하였다.

먼저 InZnO에 WO₃를 도핑하여 형성된 WInZnO 박막은 기본적으로 비정질 구조를 보이지만 O₂ 가스량 3 sccm 이상의 샘플에서 열처리 온도가 증가할수록 결정 구조를 보이고 있다. 이렇게 열처리 온도가 증가할수록 결정 구조를 보이고는 있지만 박막의 표면 거칠기는 열처리 전후의 모든 가스 분압비에 따른 샘플이 약 *R_a* ~0.7 nm 이하 로 모두 매우 부드러운 표면 상태를 보여주고 있다. 열처리 전의 WInZnO 박막의 캐 리어 농도는 가스 분압비에 의해 10²¹cm⁻³ 에서 10¹⁶cm⁻³ 까지 광범위하게 조절되었다. 박막의 열처리 온도에 의한 전기적 특성 변화에서는 열처리 온도 200 ℃에서 10¹⁹cm⁻³ 으로 비슷한 수치를 보이다가 열처리 온도가 증가할수록 급격히 감소하였다. 박막의 투과 특성은 가스 분압비에 따라 미세한 투과도 차이를 보이지만 보든 박막이 가시광 영역에서 89% 이상의 높은 투과 특성을 보이고 있어 향후 투명 소자로서 적합한 투과 특성을 보였다.

YInZnO 박막은 WInZnO 박막과는 달리 순수한 Ar 가스에서 형성 된 박막을 제외하 고 모든 샘플이 상온에서 결정구조를 보이고 있어서 박막의 표면 거칠기가 R_a ~1.55 nm 이하로 WInZnO 박막보다는 높은 거칠기 특성을 보인다. YInZnO 박막의 캐리어 농도 또한 약 10²⁰cm⁻³ 에서 10¹⁵cm⁻³ 까지 광범위하게 변화하여 Ar/O₂ 가스 분압비에 따라 캐리어 농도를 제어할 수 있었다. TaInZnO 박막은 XRD 결과 모든 박막이 비정 질 구조를 보이고 있어서 표면 거칠기 또한 약 R_a ~0.2 nm 이하로 부드러운 표면 상 태를 보였다. 그러나 투과특성에서는 모든 샘플이 84% 이상의 투과도를 보이고 있어 기존의 InZnO 박막의 80%의 투과도 보다 높아 향후 투명 디스플레이 소자로의 가능 성을 보여주고 있다.

WInZnO 박막을 채널층으로 이용한 박막 트랜지스터 특성은 μ_{sat}가 0.3 cm²/Vs로 낮은

특성을 보이지만 $I_{on/off}$ 값이 10⁴ 이상으로 비교적 좋은 특성을 보였다. YInZnO 박막을 이용한 박막 트랜지스터에서는 10⁶ 이상의 높은 $I_{on/off}$ 값을 보이고 μ_{sat} 는 7.5 cm²/Vs로 WInZnO의 박막트랜지스터보다 높은 값을 보이지만 문턱전압이 17.6V로 매우 높은 값 을 보였다. TaInZnO 박막을 채널층으로 이용한 박막트랜지스터에서는 4.8V의 문턱전 압과 높은 $I_{on/off}$ 값을 보이지만 여전히 낮은 μ_{sat} 값을 보이고 있다.

도핑과 공정 가스의 변화에 따른 박막과 이를 채널층으로 이용한 박막 트랜지스터에 서 관찰된 특성 값들은 높은 투과특성과 상온 공정을 통하여 향후 투명하고 플렉서블 한 디스플레이에 적용할 수 있는 가능성을 확인하였고, 추가 연구를 통해 문턱전압을 낮추고 이동도를 높여 그 가능성을 한층 더 발전시킬 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] 권장연, "산화물 TFT 연구 동향," 인포메이션 디스플레이, vol. 11, no. 2, pp. 2-6, 2010.
- [2] 정재경, "산화물 TFT 기술 및 AMOLED 응용", 인포메이션 디스플레이, vol. 10, no. 4, pp. 42-49, 2009.
- [3] J. Wager, "Transparent Electronics" Science., vol. 300, no. 5623, pp. 1245–1246, 2003.
- [4] H. Y. Chong, K. W. Han, Y. S. No, T. W. Kim, "Effect of the Ti molar ratio on the electrical characteristics of titanium-indium-zinc-oxide thin film transistors fabricated by using a solution process", *Appl. Phys. Lett.*, 99, 161908, 2011.
- [5] Y. M. Jeong, K. K. Song, D. J. Kim, C. Y. Koo, J. H. Moon, "Bias stress stability of solution processed zinc tin oxide thin film transistors", *J. Electrochem. Soc.*, 156, H808, 2009.
- [6] S. J. Seo, Y. H. Hwang, B. S. Bae, "Postannealing process for low temperature processed sol-gel zinc tin oxide thin film transistors", *Electrochem. Solid-State Lett.*, 13, H357, 2010.
- [7] Y. M. Jeong, C. D. Bae, D. J. Kim, K. K. Song, K. H. Woo, H. J. Shin, G. Z. Cao, J. H. Moon, "Bias-stress-stable solution-processed oxide thin film transistors", ACS Appl. Mater. Interfaces, 2, 611, 2010.
- [8] S. Y. Sung, J. H. Choi, U. B. Han, K. C. Lee, J. H. Lee, J. J. Kim, W. T. Lim, S. J. Pearton, D. P. Norton, Y. W. Heo, "Effect of ambient atmosphere on the transfer characteristics and gate-bias stress stability of amorphous

indium-gallium-zinc oxide thin film transistors", *Appl. Phys. Lett.*, 96, 102107, 2010.

- [9] J. B. Kim, C. Fuentes-Hernandez, W. J. Potscavage, Jr., X. -H. Zhang, B. Kippelen, "Low-voltage InGaZnO thin-film transistors with Al₂O₃ gate insulator grown by atomic layer deposition", *Appl. Phys. Lett.*, 94, 142107, 2009.
- [10] G. H. Kim, H. S. Shin, B. D. Ahn, K. H. Kim, W. J. Park, H. J. Kim, "Formation mechanism of solution processed nanocrystalline InGaZnO thin film as active channel layer in thin film transistor", *J. Electrochem. Soc.*, 156, H7, 2009.
- [11] E. Fortunato, L. Pereira, P. Barquinha, A. Botelho do Rego, Goncalo Goncalves, Anna Vila, J. Morante, R. Martins, "High mobility indium free amorphous oxide thin film transistors", *Appl. Phys. Lett.*, 92, 222103, 2008.
- [12] D. H. Son, D. H. Kim, J. H. Kim, S. J. Sung, E. A. Jung, J. K. Kang, "Low voltage, high performance thin film transistor with HfInZnO Channel and HfO2 gate dielectric", *Electrochem. Solid State Lett.*, 13, H274, 2010.
- [13] E. Chong, Y. S. Chun, S. Y. Lee, "Effect of trap density on the stability of SiInZnO thin film transistor under temperature and bias induced stress", *Electrochem. Solid State Lett.*, 14, H96, 2011.
- [14] 정우석, "산화물 반도체 소재 및 소자 개발 동향", 세라믹소재정보은행, vol. 8, no.291, 2012.
- [15] K. Nomura, H. Otha, A. Takagi, T. Kamiya, M. Hirano, H. Hosono, "Room-temperature fabrication of transparent flexible thin-film transistors using amorphous oxide semiconductors" *Nature*, 432, 488, 2004.

- [16] K. Nomura, H. Otha, K. Ueda, T. Kamiya, M. Hirano, H. Hosono, "Thin-Film Transistor Fabricated in Single-Crystalline Transparent Oxide Semiconductor" *Science*, vol. 300, no. 5623, pp. 1269–1272, 2003.
- [17] E. Fortunato, P. Barquinha, A. Pimentel, A. Goncalves, A. Marques, R. Martins, L. Pereira, "Wide-bandgap high-mobility ZnO thin-film transistors produced at room temperature" *Appl. Phys. Lett.*, 85, 2541, 2004.
- [18] Hsing-Hung Hsieh, Chung-Chih Wu, "Scaling behavior of ZnO transparent thin-film transistors" *Appl. Phys. Lett.*, 89, 41109 2006.
- [19] 오힘찬, "Flexible Display용 산화물 TFT 기술개발 동향 및 전망", 인포메이션 디스플레이, vol. 11, no. 6, pp. 21-26, 2010.
- [20] T. Minami, T. Kakumu, S. Takata, "Preparation of transparent and conductive In₂O₃-ZnO films by radio frequency magnetron sputtering", J. Vac. Sci. Technol. A, 14, 1704 1996.
- [21] N. Naghavi, A. Rougier, C. Marcel, C. Guery, J. B. Leriche, J. M. Tarascon, "Chracterization of indium zinc oxide thin films prepared by pulsed laser deposition using a Zn₃In₂O₆ target", *Thin Solid Films*, 360, 233–240, 2000.
- [22] A. Kaijo, Display Imaging, 4, 143, 1996.
- [23] 김종우, "산화물 박막 트랜지스터 기술동향", Trend&Technology, vol. 10, pp. 55-63, 2009.
- [24] J. Robertson, "Band offsets of wide-band-gap oxides and implications for future electronic devices", J. Vac. Sci. Technol. B, 18, 1785, 2000.
- [25] A. P. Rambu, D. Sirbu, N. Iftimie, G. I. Rusu, "Polycrystalline ZnO-In₂O₃ thin

films as gas sensors", Thin Solid Films, 520, 1303-1307, 2011.

[26] Y. S. Jung, J. Y. Seo, D. W. Jeon, "Influence of DC magnetron sputtering parameters on the properties of amorphous indium zinc oxide thin film", *Thin Solid Films*, 445, 63, 2005.

연구실적

- 프로젝트 참여 : 기획재정부 지원 하에 'Wide-band-gap을 갖는 투명 반도체 증착 공정 개발 및 AMOLED 응용을 위한 투명반도체 소자 제작 (2010년 01월-2012년 12월)'

- SCI 논문

- "Combinatorial study of WInZnO films deposited by rf magnetron co-sputtering", Journal of Solid State Chemistry, vol. 184, pp. 2462–2465, 2011
- "Thin Transparent W-Doped Indium-Zinc Oxide (WIZO) Layer on Glass", Journal of Nanoscience and Nanotechnology, vol. 12, pp. 5604–5608, 2012.
- "Characteristics of Y₂O₃-doped Indium Zinc Oxide films grown by Radio Frequency magnetron co-sputtering system", *Thin Solid Films*, accepted, 2012.
- "Electrical and Optical Properties of YIZO films fabricated by RF magnetron sputtering", Journal of Nanoscience and Nanotechnology, submitted, 2012.
- Conference 발표
- 1. "Electrical and optical properties of ZnInSnO thin films as a function of Zn content", 한국세라믹학회 춘계학술대회, Korea, 21-22 Apr. 2011.
- "O₂/Ar 분압비에 따른 W-In-Zn Oxide 박막의 특성 평가", 한국재료학회 춘계학 술대회, Korea, 26-27 May. 2011.
- 3. "Properties of W-In-Zn Oxide thin films prepared by rf magnetron sputtering", 한국전기전자재료학회 하계학술대회, Korea, June 22-24, 2011.
- 4. "The annealing effect on structural and electrical properties of thin WO3-doped IZO films," 대한전자공학회 하계학술대회, Korea, June 22-24, 2011.
- "Post annealing effect on thin transparent W-doped Indium-Zinc Oxide (IZO) layer on glass", The 9th International Nanotech Symposium, Korea, Aug.

24-26, 2011.

- "Effect of Ar/O2 Ration on Properties of Thin Yttrium-Indium-Zinc-Oxide (YZIO) Films", International Conference on Advanced Electromaterials, Korea, Nov. 7-10, 2011.
- "Electrical Properties of Thin Y2O3-doped Indium Zinc Oxide Films(YIZO) by RF Magnetron Sputtering", 17th Workshop on Dielectrics in Microelectronics, Germany, June 25–27, 2012.
- "Electrical Properties of YInZnO Thin-Film Transistor Fabricated by RF Magnetron Sputtering", The 10th International Nanotech Symposium, Korea, Aug. 16–18, 2012.
- "Synthesis of CIGS absorber layer on plastic substrates by one-step sputtering process", Global Photovoltaic Conference 2012, Korea, Nov. 19-21, 2012.
- Conference 발표 (공동)
- 1. "아르곤/산소 분압비에 따른 W-In-Zn-O 박막의 전기, 광학적 특성 평가", 한국 세라믹학회 춘계학술대회, Korea, 21-22 Apr. 2011.
- "염료감응형 태양전지응용을 위한 Ti-In-Zn-O 다성분계 박막의 전기, 광학적 특성", 한국세라믹학회 춘계학술대회, Korea, 21-22 Apr. 2011.
- "AZO/Ag 이중구조 박막을 이용한 Si 박막태양전지용 후면 반사막층의 전기, 광학적 특성 평가", 한국세라믹학회 춘계학술대회, Korea, 21-22 Apr. 2011.
- 4. "다성분계 TiInZnO 박막의 Ti 함량에 따른 전기, 광학적 특성평가", 한국재료학 회 춘계학술대회, Korea, 26-27 May. 2011.
- 5. "Electrical and optical properties of amorphous tungsten-indium-zinc oxide films for an active channel layer in thin film transistors", 한국재료학회 춘 계학술대회, Korea, 26-27 May. 2011.
- "Electrical Properties of TaInZnO Thin-Film Transistor Fabricated by RF Magnetron Sputtering", International Conference on Advanced Electromaterials, Korea, Nov. 7-10, 2011.

- "Nobel TaInZnO Thin-Film Transistor Fabricated by RF Magnetron Sputtering", The 28th Japan-Korea International Seminar on Ceramics, Japan, Nov. 23-26, 2011.
- 8. "Compositionally combinatorial study of TIZO films deposited by RF magnetron co-sputtering system", 제9회 투명산화물반도체 학술대회, Korea, June 20-22, 2012.
- 9. "A systematic process to fabricate Nb-doped TiO₂ (NTO) thin films by combinatorial RF-magnetron sputtering system", 제9회 투명산화물반도체 학 술대회, Korea, June 20-22, 2012.
- 10. **"Electro-spray 방식으로 중착한 ITO 박막의 특성"**, 한국전기전자재료학회 하계 학술대회, Korea, June 27-29, 2012.
- 11. "The properties of Ti doped In-Zn-O(TIZO)/Ag/TIZO thin films deposited by combinatorial magnetron sputtering system", 한국전기전자재료 학회 하계학술대회, Korea, June 27-29, 2012.
- 12. "Properties of ITO Thin Film Deposited by Electro-spray Method", 한국세 라믹학회 춘계총회, Korea, Apr. 19-20, 2012.
- 13. "Fabrication of low resistance and high transparent Ti doped InZnO(TIZO)/Ag/TIZO thin films using combinatorial magnetron sputtering system", 한국재료학회 춘계학술대회, Korea, May 17-18, 2012.
- 14. "Properties of ITO thin film deposited by electro-spray method", 한국재료 학회 춘계학술대회, Korea, May 17-18, 2012.
- "Compositionally gradient CIS-CGS absorber layers grown on plastic substrates by one-step sputtering process", Global Photovoltaic Conference 2012, Korea, Nov. 19-21, 2012.
- 16. "Fabrication of CIS absorber layers on plastic substrates by one-step sputtering process for the application to flexible solar cells", Global Photovoltaic Conference 2012, Korea, Nov. 19-21, 2012.

- Proceeding Paper
- 1. "The annealing effect on structural and electrical properties of thin WO₃-doped IZO films", 대한전자공학회 하계학술대회, vol. 34, no.1, pp. 446-448, 2011.

- 국내 특허

 "탄탈륨-인듐-아연-옥사이드계 아몰퍼스 산화물, 상기 산화물 합성방법 및 상기 산화물을 포함하여 형성된 채널층을 구비한 전계효과 트랜지스터", 출원번호 10-2012-0042735