

理學碩士 審査請求論文

ZnO 박막의 스퍼터 증착 조건에 따른 박막 트랜지스터 특성 연구

A Study on ZnO TFT's characteristics by Sputtering condition of  
ZnO active layer

2008年 2月

韓國海洋大學校 大學院

應用科學科

鄭宰賢

理學碩士 學位論文

ZnO 박막의 스퍼터 증착 조건에 따른 박막 트랜지스터 특성 연구

A Study on ZnO TFT's characteristics by Sputtering condition of  
ZnO active layer

指導教授

金泓承

2008年 2月

韓國海洋大學校 大學院

應用科學科

鄭宰賢

## 목 차

Abstract .....	1
논문 요약.....	2
제 1 장 서론.....	3
1.1 연구 배경 .....	3
1.2 ZnO의 특성.....	7
1.2.1 ZnO의 결정구조.....	7
1.2.2 ZnO의 광학적 특징.....	10
1.2.3 ZnO의 전기적 특징.....	14
1.3 ZnO-TFT 특성.....	15
1.4 참고 문헌.....	19
제 2 장 실험 방법.....	21
2.1 전극 증착 .....	21
2.2 ZnO 박막 증착 .....	23
2.3 Annealing .....	24
2.4 Sputter .....	26
2.4.1 Sputtering .....	26
2.4.2 Sputtering의 원리.....	26
2.5 ZnO 박막 분석 .....	29
2.5.1 AFM .....	29
2.5.2 XRD .....	33
2.5.3 I-V measurement .....	36
2.6 참고문헌.....	41

제 3 장 실험 결과 .....	42
3.1 ZnO-TFT 구조적 특성평가 .....	42
3.1.1 XRD 결과 .....	42
3.1.2 TEM 결과 .....	43
3.1.3 AFM 결과 .....	43
3.2 ZnO-TFT 전기적 특성평가 .....	45
3.2.1 $I_D$ - $V_{DS}$ 결과 .....	45
3.2.2 활성층 두께에 따른 누설전류 .....	48
3.2.3 결정립 크기에 따른 이동도 .....	49
3.3 참고 문헌 .....	50
제 4 장 결론 .....	51

## *Abstract*

We investigate the characteristics of ZnO thin film transistor by thickness of ZnO active layers. The TFTs used in this experiment were all bottom-gate-type TFTs on Si(100) substrate. An Al of 300 nm thickness was used as a gate electrode, a 300 nm thick SiO<sub>2</sub> as a gate insulator and a 300 nm thick Al as a source and drain electrode. The ZnO layers with the thickness of 30 nm to 300 nm were deposited by Radio-Frequency(RF) sputtering at room temperature. ZnO film was annealed by thermal oxidation furnace in N<sub>2</sub> ambient at 300 °C for 2 hours after the deposition. The structural properties of ZnO films were investigated by an atomic force microscope(AFM) and a X-ray diffraction(XRD), and the electrical characteristics of ZnO-TFTs were measured using a semiconductor parameter analyzer(Agilent 4155C). As the active layer was thicker, the leakage current was lower and mobility was higher. Considering the leakage current and mobility, the 55 nm of ZnO active layer presented the best performance properties. On this occasion, the leakage current is  $9.97 \times 10^{-8}$  A, the channel mobility is  $0.16 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ , and the threshold current is 12.7 V.

## 논문 요약

본 연구에서는 ZnO 박막의 스퍼터 증착 조건에 따른 결정립 크기와 박막 두께에 대한 트랜지스터의 동작 특성을 알아보았다. ZnO 박막은 Radio-Frequency(RF) sputtering 법에 의해 상온에서 30 nm 에서 300 nm 의 두께로 증착하였다. 활성층으로써 ZnO 박막 두께가 클수록 누설 전류와 이동도는 증가하였고, 결정립 크기가 클수록 이동도도 증가하였다. 누설 전류와 이동도를 고려해 보면 ZnO 활성층의 두께가 55 nm 일 때, 트랜지스터의 특성이 다른 활성층의 두께를 가지는 트랜지스터 동작 특성에 비해 안정적인 것을 확인할 수 있었다.

## 제 1 장 서 론

### 1.1 연구배경

급속한 정보화 기술의 진전으로 언제 어디서나 정보를 접할 수 있는 유비쿼터스 컴퓨팅의 시대로 접어들고 있으며, 전자기기의 진화와 더불어 다양한 정보를 인간에게 언제 어디서나 전달하는 정보전달 매체로서 외부충격에 강하며, 휴대하기 편하고, 경량, 박형이면서 임의의 형태로 패널구현이 가능하고, 특히 유연하여 종이처럼 접거나 두루마리의 형태까지도 가능한 디스플레이의 개발 필요성이 증대하면서 시대적 요구 및 사회적 필요성에 의해 기존의 디스플레이를 대체할 수 있는 차세대 플렉시블 디스플레이에 대한 연구가 국내외에서 활발히 진행되고 있다. 플렉시블(flexible) 디스플레이는 90년대 후반 주로 저가형 수동 구동 방식을 이용한 디스플레이를 중심을 발전해 왔으나 현재에는 능동 구동 방식을 이용한 디스플레이로 방향이 전환된 상태이다. 플렉시블 능동 구동 디스플레이 기술은 크게 두가지 형태로 진보하고 있는데, 우선 기존의 비정질 및 다결정 실리콘 박막 트랜지스터(thin film transistor, TFT) 기술을 플렉시블 기반에 적합하도록 개선하는 기술이 개발되고 있다. 또 다른 하나는 활성층(active layer)를 기존의 실리콘 대신 pentacene, P3HT(poly (3-hexylthiophene))등과 같은 유기 반도체로 대체한 유기 박막 트랜지스터(organic thin film transistor, OTFT) 기반의 플렉시블 디스플레이 기술 개발 역시 최근 들어 활기를 띠고 있다.

먼저 비정질 실리콘 TFT는 지난 10여년 동안 평판 디스플레이 산업에서 중요한 구성 요소가 되어왔고 비정질 실리콘 기술을 적용한 플렉시블 능동 구동 액정 디스플레이 및 전자종이(Electronic paper, E-paper) 시제품이 90년대 후반부터 발표되기 시작되었으며 이후 일본을 중심으로 미국, 한국 등에서도 시

제품들을 선보였다. E-Ink에서 지난 2002년 5인치급의 4,096 컬러 디스플레이 (320xRGBx234.80 dpi) 시제품을 선보였고 최근 Philips와 함께 고해상도의 모노타입(160dpi)의 전자종이 제품양산에 박차를 가하고 있다. 그럼에도 불구하고 비정질 실리콘을 기반으로 하는 TFT 기술은 낮은 이동도 ( $\mu \leq 2 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ )를 수반하는 문제점이 있다. 이런 이동도의 문제는 아직까지 잔류 영상 등의 문제점을 해결하지 못하고 있다. 최근에는 Transfer 기술을 이용한 플렉시블 기반의 저온 폴리 실리콘 TFT 능동구동 액정디스플레이등도 선보였다. 주로 Sony와 Seiko-Epson이 이 분야에서 주도권을 가지고 있다. 저온 다결정 실리콘 TFT를 적용할 경우 높은 높은 이동도 ( $50 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s} \leq \mu \leq 500 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ )로 인해 게이트 및 신호 드라이버 회로나 디지털/아날로그 변환 회로등이 비정질 실리콘을 이용할 경우보다 한차원 높은 수준의 플렉시블 디스플레이를 구현할 수 있다. 그러나 다결정 실리콘의 결정화는 최저 온도가 400-500 °C 이상이 온도가 필요하다. 이는 고분자를 이용한 구부릴 수 있는 기판 즉 플렉시블한 기판에서 요구되는 상온이나 200 °C 이하의 처리 온도보다 큰 온도으로써 기판에 상당히 큰 열적 부담을 주게 된다. 따라서 Transfer 기술의 핵심은 유리기판 상에 제작된 패널을 우선 다른 기판에 접착제로 붙인 후 유리기판을 식각하고 다시 고분자 기판에 접착하는 방법이나 XeCl 레이저를 이용한 SUFTLS(surface free technology by laser ablation/annealing) 방식을 채택하고 있다. 그러나 이러한 방식들은 간접적으로 플렉시블 기판에 회로를 만드는 방식으로 직접적으로 회로를 구성하는 기술에 비해 경제성이 많이 떨어진다.

또 다른 기술 방향인 유기물 반도체를 이용한 OTFT 기술은 80년대 후반부터 시작되었지만 최근에 들어서야 가시적인 결과가 나타나기 시작했다. 그러나 기존의 실리콘 기술에 비해 아직까지는 관련 기술 및 재료등이 뒷받침해주지 못하고 있어서 성장 가능성을 크게 보고는 있지만 실제 제품으로 선보이기까지 시간이 걸릴 것으로 예상되고 있다. 유기 박막 트랜지스터 역시 OLED와



비슷하게 pentacene과 같은 저분자 물질과 P3HT등과 같은 고분자 재료등이 사용되고 있다. pentacene의 경우 비정질 실리콘과 비슷하거나 우수한 특성을 보여주지만 고분자 재료는 solution process가 가능하고 향후 roll-to-roll 공정이 적용될 수 있다는 장점이 있다. 그러나 유기물을 이용한 경우 소자의 안정성이 가장 큰 문제로 유기물이 대기중에 존재하는 산소나 수분에 의해 특성이 급격히 저하되기 때문이다. 이런 소자의 신뢰성 문제로 현재까지 발표된 유기 박막 트랜지스터를 이용한 디스플레이는 그리 많지 않다. 그리고 주로 연구소를 중심으로 발표가 이루어지고 있고 아직까지는 모노 칼라급 정도만 발표되고 있다.

또한 위의 실리콘이나 유기물 박막 트랜지스터 기술들은 최근에 많이 개발되어져 있고 큰 기술적 흐름인 OLED(organic light emitting display)에서 능동 구동 어레이로 사용될 경우 가시광 영역에서의 불투명성이 미래의 디스플레이 응용에 있어 또 하나의 큰 제한이 되고 있다. 이에 최근에 투과성 산화 반도체를 박막 트랜지스터의 활성층 즉 채널층에 사용하고자하는 연구가 진행 중에 있다. 이러한 투과 산화 반도체의 사용은 LCD에서 백라이트(back light) 그리고 OLED의 발광빛을 효율적으로 사용할 수 있고 가시광 영역에서의 소자 거동이 영향 받지 않는다. 그리고 또한 고전압, 고온 그리고 반사선등에 대해 좋은 신뢰성을 가지고 있다. 그러나 낮은 on-to-off-current ratio 그리고 나쁜 재현성등으로 문제점을 가지고 있다. 이러한 산화 반도체로는 SnO<sub>2</sub>와 ZnO가 많이 사용되어 왔다. 그중 ZnO는 3.3 eV의 넓은 에너지 밴드갭과 실온에서 60 meV의 큰 엑시톤 결합 에너지를 갖는 직접 천이형 II-VI족 화합물 반도체이다. 이러한 특성 때문에 단파장 영역에서의 발광 다이오드 (Light Emitting Diode, LED) 와 레이저 다이오드 (Laser Diode, LD) 제조에서 주목 받고 있다. 그러나 현재 박막 트랜지스터에서는 활성층으로써 진성 ZnO의 사용한 경우[1-4].-특히 ZnO은 비정질 유리나 플라스틱 같은 다양한 기판에 비교적

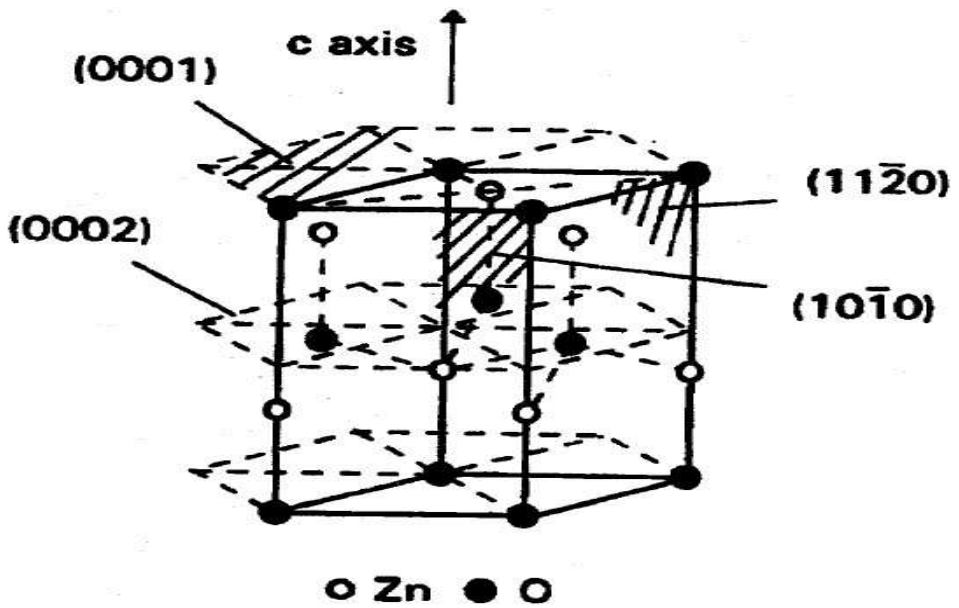
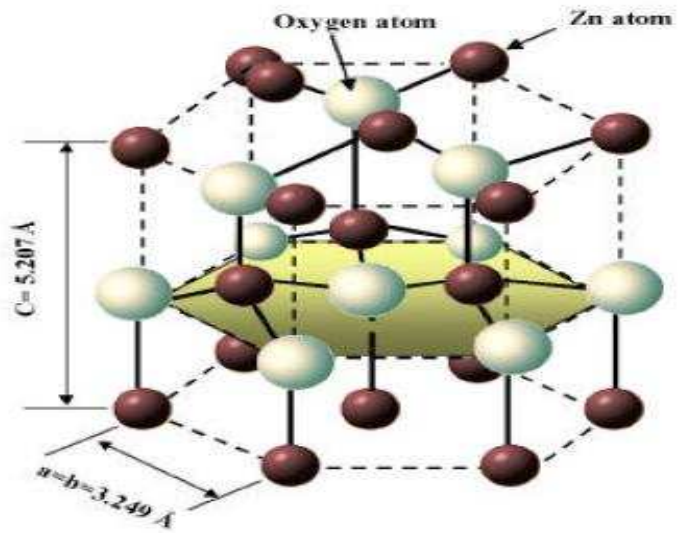
낮은 증착온도에서 결정성을 갖는 물질로 성장시킬 수 있는 몇 안 되는 산화물 중에 하나이기도 하다[5]- ZnO는 넓은 에너지 밴드갭을 가지기 때문에 가시광에 노출되었을 때 그 특성이 저하되지 않고 가시광선으로부터 활성 채널층의 부호막이 필요없고. 따라서 TFT의 구조가 간편해지고 가시광 영역에서의 투명도도 향상되며 ZnO TTFTs의 또 하나의 주요한 이점은 전자의 채널 이동도에 따라 더 높은 drive current와 더 빠른 소자 동작 속도를 얻을 수 있다. 보고되어진 ZnO TTFTs의 이동도는  $0.2 \sim 7 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ,  $I_{\text{on}} / I_{\text{off}}$  비는  $10^5 \sim 10^7$ ,  $V_{\text{TH}}$  (threshold voltage)는  $-1 \text{ V} \sim 15 \text{ V}$ 이다. ZnO의 활성 채널층은 주로 sputer법, PLD (pulsed laser deposition)법 등 진공 증착 방법에 의해서 증착되고 있다. Satoshi Masuda 등은 활성 채널층으로 ZnO를 이용하여 bottom-gate 방식의 ZnO TTFT를 구현하였다. ZnO 박막은 PLD법으로 증착하고 background carrier concentration은  $5 \times 10^{16}/\text{cm}^3$  이하가 되도록 하였다. 이 연구에서는  $\text{SiO}_2$ 와  $\text{SiN}_x$ 의 이중 게이트 절연체 층을 이용함으로써 누설전류를 제거하고 ZnO TTFT가 성공적으로 동작되도록 하였다. 그리고 Si기판위에 만들어진 ZnO TTFT의  $I_{\text{on}} / I_{\text{off}}$  비는  $10^5$  이상이었다. 유리기판위에 만들어진 ZnO TTFT의 광투과율이 80 % 이상으로 가시광 영역에서도 충분히 동작할 수 있음을 보여준다[3]. 이외에 Elvira M. C. Fortunato등이 bottom-gate 방식의 ZnO TTFT를 구현하였다. ZnO 박막은 rf magnetron sputtering법에 의해 유리기판위에 실온에서 증착되었다. background carrier concentration을 줄이기 위해 rf power를 조절하여  $3 \times 10^{16}/\text{cm}^3$  농도의 박막을 증착하였고 이때 TFT의 이동도가 약  $20 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ,  $V_{\text{TH}}$ 가 21 V였다. 가시광 영역에서의 광투과율이 80 %였다[6].

그러므로 본 논문에서는 ZnO 활성층의 두께를 최적화 시킴으로써 누설전류를 최소화 시키고, ZnO-TFT의 동작특성을 향상시키고자 한다. 본 실험에서는 RF-sputtering 방법으로 상온에서 두께를 30 nm 에서 300 nm 까지 달리하며 ZnO 활성 채널층을 증착하였다.

## 1.2 ZnO의 특성

### 1.2.1 ZnO의 결정구조

ZnO는 가시광선 영역에서 투과율이 80% 이상으로 solar cell의 투명전극으로 사용된다. 그리고 Zn가 과잉일 경우 갈색을 띤다. 결정구조는 O 이온이 hexagonal site에 위치하고, Zn 이온은 tetrahedral interstitial site 위치에 과반수를 차지하며 Zn 층과 O 층이 교대로 구성되어 있는 우르짜이트(Wurtzite)의 결정 구조로 격자 상수는  $a = 3.24 \text{ \AA}$ ,  $c = 5.20 \text{ \AA}$ 이다. ZnO의 결정 구조는 [그림 1-1]에 나타내었다. 이러한 구조는 Zn과 O의 직경이 다르기 때문에 비교적 큰 사면체 간격이 존재하며 Zn 원자가 이들 자리에 침투하여 침투형 Zn이 된다. 보통 각 이온들은 항상 사면체 등방성이 아니고, c축 방향의 간격이 다른 이온 간의 거리보다 짧으며 이로 인해 effective ionic charge의 비가 1:1:2이다. (1010)면에 평행인 c축이 극성 축이고, c축에 수직인 (0001)면과 (000 $\bar{1}$ )면이 극성 면이다. ZnO는 부분적으로 이온 결합의 특성을 가지는데 Zn 원자가 O원자에 전자를 주는 경향이 있어서 Zn 원자로만 구성된(0001)면은 상대적으로 양전하를 띠게 되고 O 원자로만 구성된 (000 $\bar{1}$ )면은 음전하를 띠게 된다[15]. 이러한 결합 특성으로 인해 Zn 층은 O층에 비하여 상대적으로 큰 표면에너지, 빠른 성장속도, 큰 부식 및 마모 저항성을 가진다. ZnO의 밀도는  $5.72 \text{ g/cm}^3$ 으로 분자밀도가  $4.21 \times 10^{22} \text{ molecules/cm}^3$ 에 해당한다. ZnO의 일반적인 성질은 [표 1-1]에 나타내었다.



[그림 1.1] ZnO 결정구조

Property	Value
Molecular mass	81.389
Specific gravity at room temp.(300 K)	5.642 g/cm <sup>3</sup>
Point group	6 mm (Wurtzite)
Lattice constants at room temp. (300 K)	a=3.242 Å, c=5.205 Å
Mohs hardness	4
Melting point	2250 K
a-axis direction	4.75
c-axis direction	2.92
Electron mass	0.28
Hole mass	1.8
Bandgap energy at room temp. (300 K)	3.37 eV
Exciton binding energy	60 meV
Specific heat	0.125 cal/gm
Thermal conductivity	0.006 cal/cm/K
Thermoelectric constant at 574 K	1200 mV/K
Work function	4.5 eV
Electron concentration	$7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
Electro-mechanical coefficient, $\kappa_2$ (%)	c-axis : 0.6 ~ 1.9 (1120) : 4.5 ~ 6.0

[표 1.1] ZnO 물질의 기본적인 특성

## 1.2.2 ZnO의 광학적 특징

ZnO는 상온에서 3.36 eV의 넓은 에너지 밴드갭을 가지고 있다. 우수한 전기적, 광학적, 그리고 압전 특성을 가지고 있어 광소자로의 응용 가능성이 크다. 특히 엑시톤 결합 에너지가 상온에서 60 meV로 매우 안정적으로 GaN(22 meV)나 ZnS(29 meV)에 비해 매우크기 때문에 광소자의 효율을 극대화 할 수 있다. ZnO 박막은 3.36 eV 정도의 에너지 밴드갭을 가지고 있으므로, UV영역에서의 발광 특성을 나타낸다. 결합이 없는 단결정으로 성장할 경우 절연체나 박막화 될 경우 n-type 반도체의 특성을 갖게 된다. Zn의 과잉이나 O의 부족으로 인해 전자를 캐리어로 갖는 n-type 반도체의 특성을 가진다. 또한 산소결핍에 의해 생성된 도너 준위로 인해 PL(photoluminescence) 측정 시 녹색영역에서의 발광을 나타낸다[16-18]. ZnO 박막은 녹색 영역에서의 발광이외에도 주황색 등의 가시광선 영역의 발광을 나타낸다. 발광 현상은 물질에 에너지를 가했을 때 물질의 양자화된 에너지 밴드 갭만큼 빛을 방출하는 것을 나타내며, 반도체 내에서 발광은 크게 4가지 메커니즘으로 나누어 볼 수 있으며, 엑시톤 재결합(exciton recombination), 대역간 재결합(band to-band recombination), 대역 불순물간 전이(band to impurity transition), 도너-억셉터쌍 전이(donor-acceptor pair transition)이다.

### 1) 엑시톤 재결합(exciton recombination)

순수한 반도체 결정의 원자들이 밴드갭 에너지 이상의 에너지를 갖는 광자에 의하여 여기 되면 가전자대의 전자는 전도대로 여기 되고 가전자대에는 양으로 대전된 정공이 남게 된다. 이때 정공으로부터 충분히 벗어나지 못하게 여기된 전자는 정공과 재결합할 수 없는 안정한 상태로 되어

엑시톤(exciton)을 형성한다. 엑시톤은 상호 쿨롱(coulomb)인력이 작용하여 수소 원자처럼 전자가 정공 주위에서 양자화된 에너지 상태로 존재하게 되며 이때 전자와 정공간의 결합을 자유 엑시톤(free exciton)이라 한다. 수소 모형으로 자유 엑시톤(free exciton)의 이온화 에너지는 다음과 같다.

$$E_{ex} = - \frac{m_r^* e^4}{2 \hbar^2 \epsilon^2 n^2}, \quad n=1, 2, 3 \dots \dots \dots [1-1]$$

$$\frac{1}{m_r^*} = \frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*}$$

여기서  $m_r^*$  는 전자와 정공 쌍의 환산 질량이며,  $\epsilon$ 은 유전상수,  $n$ 은 엑시톤을 나타내는 양자수이다. 전도대의 바닥 에너지를 0으로 할 때 전자와 정공 쌍의 정전기적 인력에 의해 자유 엑시톤의 발광 에너지는 밴드갭 에너지보다  $\frac{m_r^* e^4}{2 \hbar^2 \epsilon^2 n^2}$  만큼 작다. 또한 자유 엑시톤에 의해 방출되는 발광 에너지는 다음과 같다.

$$h\nu = E_g - E_{ex} \dots \dots \dots [1-2]$$

## 2) 대역간 재결합(band to-band recombination)

대역간 재결합은 전자가 반도체의 전도대역에서 가전자대역으로의 재결합이 나타나는 발광현상으로 반도체의 에너지 밴드갭 만큼의 빛을 방출하며, 이 경우 방출되는 발광 에너지는 다음과 같다.

$$h\nu = E_g \dots \dots \dots [1-3]$$

3) 대역 불순물간 전이(band to impurity transition)

전도대의 전자가 억셉터 준위의 구속된 정공과의 재결합과 도너 준위의 구속 전자와 가전자대의 정공과의 전이를 말한다. 각각의 방출에너지는 다음과 같으며 여기서  $E_D$ 는 도너의 이온화 에너지이며,  $E_A$ 는 억셉터의 이온화 에너지이다.

$$h\nu = E_g - E_D \pm \frac{kT}{2} \text{ (donor to valence band)}$$

$$h\nu = E_g - E_A \pm \frac{kT}{2} \text{ (conduction band to acceptor) -----[1.4]}$$

4) 도너-억셉터쌍 재결합(donor-acceptor pair transition)

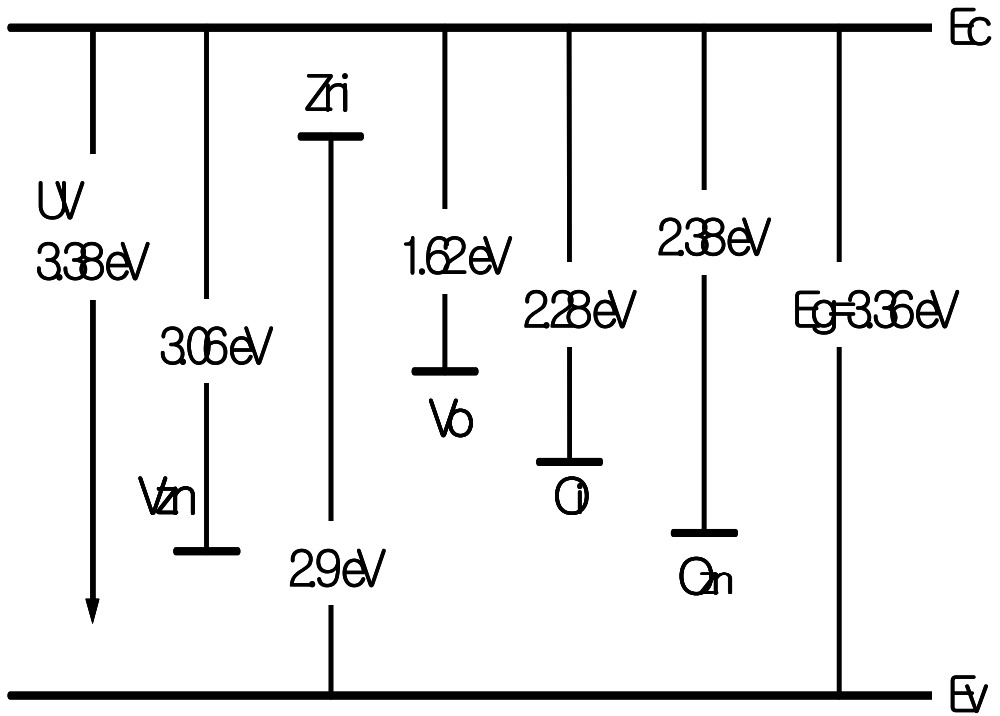
물질내의 도너 준위와 억셉터 준위가 같이 형성되어 있다면 도너에 구속된 전자와 억셉터에 구속된 정공과의 재결합이 나타날 수 있는데 이를 도너-억셉터간 전이라 한다. 이 과정에 의한 광자(photon)에너지는 다음의 식과 같다.

$$h\nu = E_g - E_D - E_A + \frac{e^2}{4\pi\epsilon r} \text{ -----[1.5]}$$

마지막 항은 도너와 억셉터간의 쿨롱 인력을 나타낸다.

[그림 1.2]는 ZnO의 defect level을 보여준다.

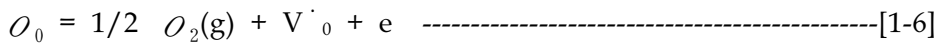




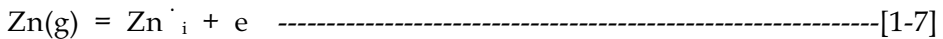
[그림 1.2] Defect level in ZnO

### 1.2.3 ZnO의 전기적 특징

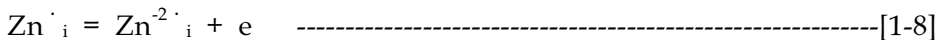
ZnO는 II-VI족 화합물로 밴드갭이 3.36 eV인 n-type 반도체로 알려져 있으며  $Zn_xO_{1-x}$ 의 산소 결핍형 산화물로 보고 되고 있다[19]. n-type 형의 산소 결핍형 산화물이 되려면 산소 공공이 존재하거나 침입형 Zn이 존재하거나 둘 다 존재하는 경우이다. ZnO의 결정은 산소 결핍형 산화물이기 때문에 다음과 같은 결합 반응이 있으며 다음과 같이 표시된다. 정상 격자에서 산소원자 자리에 산소원자가 ( $O_0$ ) 외부의 가스 상으로 이동하면서 산소 공공을 만드는 경우이다. 이때의 반응식은 다음과 같다.



위의 식과 같이 산소 공공이 이온화 되면서 전자를 방출하며 donor로서 작용한다. 정상 격자에 있는 Zn는 침입형 Zn가 되고 침입형 Zn는 쉽게 다음 식에 의하여 이온화 된다.

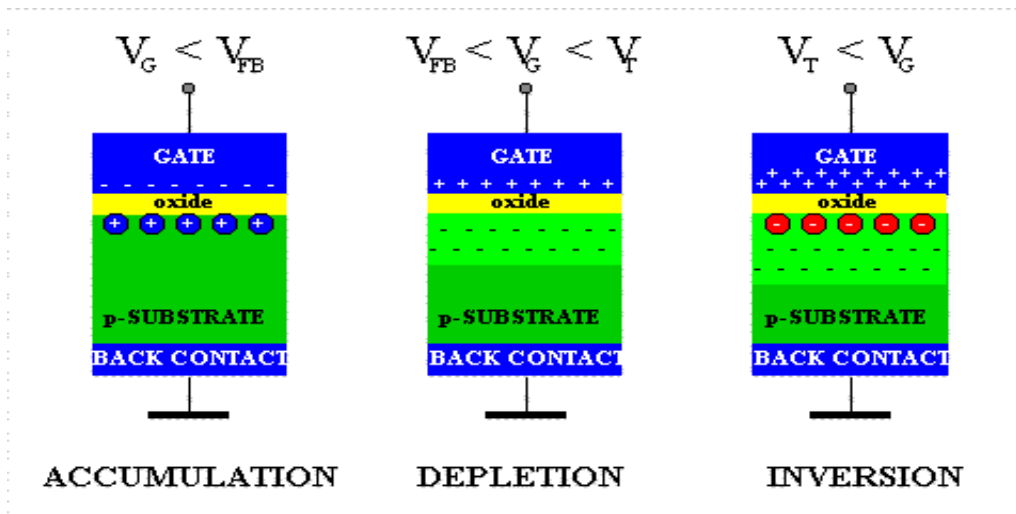


이 경우에도 산소 공공과 마찬가지로 donor로 작용하며 전자를 제공하여 n-type 반도체의 특성을 나타낸다. 산소 공공과 마찬가지로 conduction band edge에 매우 가까운 level에 shallow donor level 이 형성이 되어 상온에서 쉽게 활성화된다. 침입형 Zn의 경우 다음 식에 의한 두 번째 이온화 과정을 거치게 되면 이 과정 역시 전자를 제공하게 된다.



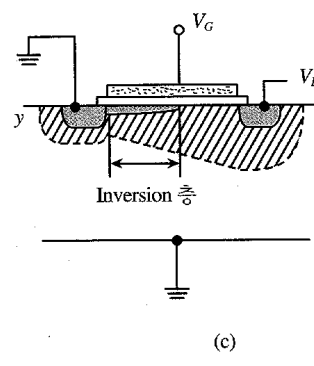
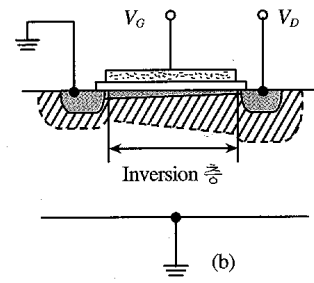
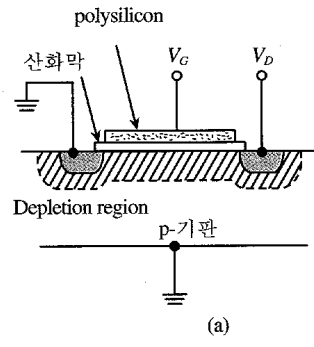
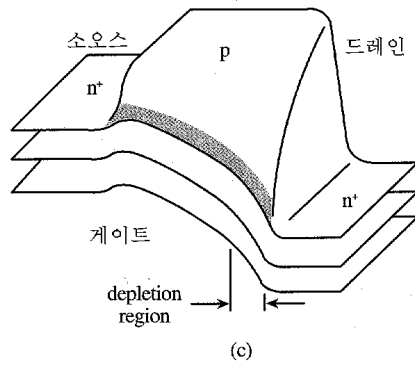
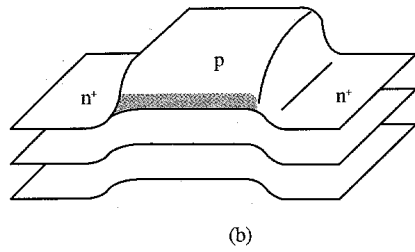
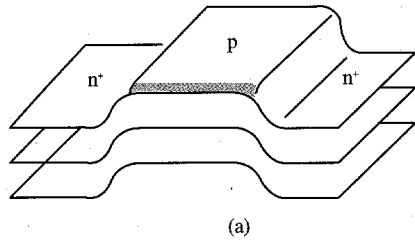
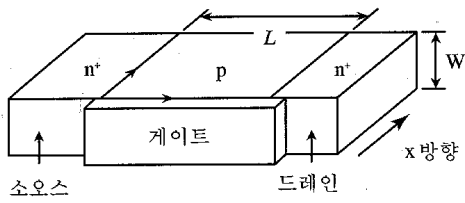
### 1.3 ZnO 박막 트랜지스터의 작동 특성

보통의 MOS 트랜지스터는 주로 게이트 전압에 따라 반도체 표면 부분에 소수 캐리어를 형성 하게 하는 조건에서 소스와 드레인 사이에 전류를 통하게 된다. 그림은 MOS 캐패시스터에서의 게이트 전압에 따른 반도체와 절연막 사이의 계면 상태 변화를 보여주고 있다. 반도체 기판은 p형으로 게이트 전압이 flat-band voltage 보다 작은 음의 전압들이 인가되면 p-형 반도체의 다수 캐리어인 정공이 계면쪽으로 이동해 오고 이에 계면 쪽에 정공이 많이 증가하여 정공에 의한 전도층이 형성된다. 이러한 상태를 accumulation 상태로 불린다. 역으로 flat-band voltage보다 어느정도 큰 양의 전압이 인가되면 정공들이 계면에서 밀려나며 캐리어가 없어진 고갈층이 형성된다. 이때 상황을 depletion 상태로 불린다. 이에 더 큰 전압 문턱전압 이상의 양의 전압이 인가되면 소수 캐리어인 전자가 계면쪽으로 이동하여 전자에 의한 전도층이 형성되고 이를 inversion 상태라고 부른다. [그림 1.3]



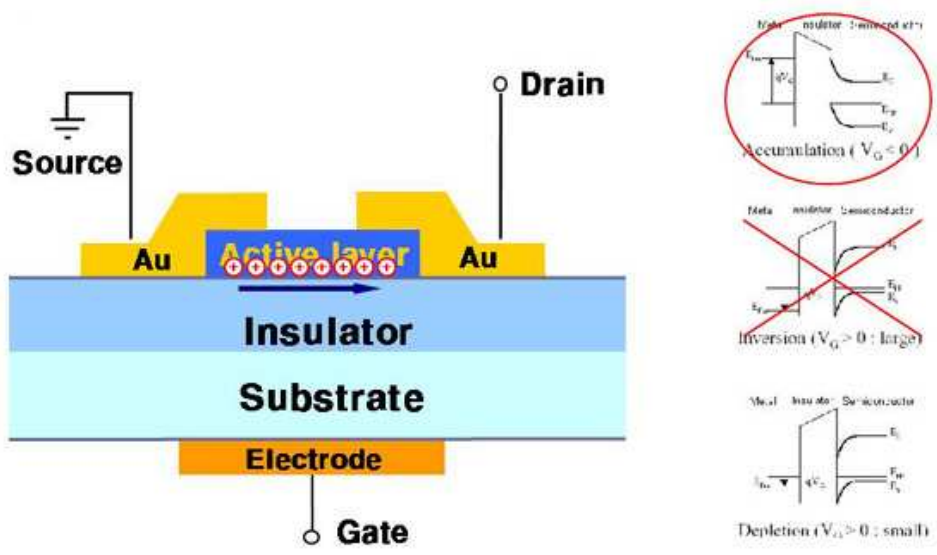
[그림 1.3] 게이트 전압에 따른 MOS 캐패시터 변화

보통의 MOS transistor는 inversion 상태를 이용한 트랜지스터 작동 기구를 보여준다. 즉 [그림1.4]과 같이 기판과 다른 도핑 상태의 n+의 소스와 드레인을 영역을 형성하여 주고 (a)와 같이 문턱전압이하의 전압이 인가되어 반도체와 절연막 사이 계면 상태가 inversion이나 depletion 상태이면 소스와 드레인 영역에 전압을 인가하여도 전류가 흐르지 않는다. 그렇지만 (b) 상태와 같이 문턱전압 이상의 전압이 인가되어 inversion 상태가 되면 소스와 드레인과 같은 도핑 상태인 n 층이 형성된다. 이를 채널라고 하고 이를 통해 전류가 소스에서 드레인으로 흐르면 소스와 드레인간의 전압에 따라 전류가 증가한다. 그러다가 (c) 상태와 같이 소스 드레인간 전압이 게이트 전압과 일정해져서 드레인 게이트 전압이 문턱전압이하가 되면 핀치 오프가 일어나 드레인쪽 채널이 없어지면서 흐르는 전류가 포화상태가 된다.



[그림 1.4] 게이트 전압에 대한 MOS 트랜지스터 작동 원리

[그림 1.4]와 같은 작동으로 보통의 트랜지스터가 작동을 하게 된다. 그러나 ZnO 박막 트랜지스터는 이와는 달리 [그림1.5]와 같은 accumulation 상태를 이용한 트랜지스터의 작동을 보여 주고 있다.



[그림 1.5] ZnO 박막 트랜지스터 작동 원리

#### 1.4 참고 문헌

- [1] S. Masuda, K. Kitamura, Y. Okumura, S. Miyatake, H. Tabata, T. Kawai, J. Appl. Phys. 93, 1624 (2003)
- [2] R. L. Hoffman, B. J. Norris, J. F. Wager, Appl. Phys. Lett. 82, 733 (2003)
- [3] P. F. Carcia, R. S. Mclean, M. H. Reilly, G. Nunes, Appl. Phys. Lett. 82, 1117 (2003)
- [4] H. S. Bae, J. H. Yoon, J. H. Kim, S. Im, Appl. Phys. Lett. 83, 5313 (2003)
- [5] H. J. Ko, Y. F. Chen, T. Yao, K. Miyajima, A. Yamamoto, and T. Goto, Appl. Phys. Lett. 77, 537 (2000)
- [6] Elvira M. C. Fortunato, Dedro M. C. Barquinha, and Alexandra M. F. Goncalves, Antonio J. S. Marques, Luis M. N. Pereira, and Rodrigo F. P. Martins, Adv. Mater. 17, 5 (2005)
- [7] B.Lin, Z.Fu, Y.Jia, and G.Liao, Journal of The Electrochemical Society, 148 (3) G110-113(2001)
- [8] H. -J.Ko, T.Yao, Y.Chen, and S. -K. Hong, J. Appl. Phys. 92, 4354 (2002)
- [9] T. Ohgaki, N. Ohashi, H. Kakemoto, S. Wada, Y.Adachi, H.Haneda, and T. Tsurumi, J. Appl. Phys. 93, 1961 (2002)
- [10] Y. Ito, K. Kushida, H. Kanda, H. Takeuchi, K. Sugaware and H. Onozato, Ferroelectrics, 134, 325 (1992)
- [11] T. Yamazaki, S. Wada, T. Noma, and T. Suzuki, Sensors Actuators, B13-14, 594 (1993)
- [12] W. W. Wenas, A. Yamada, and K. Takahashi, J. Appl. Phys., 70, 7119 (1991)

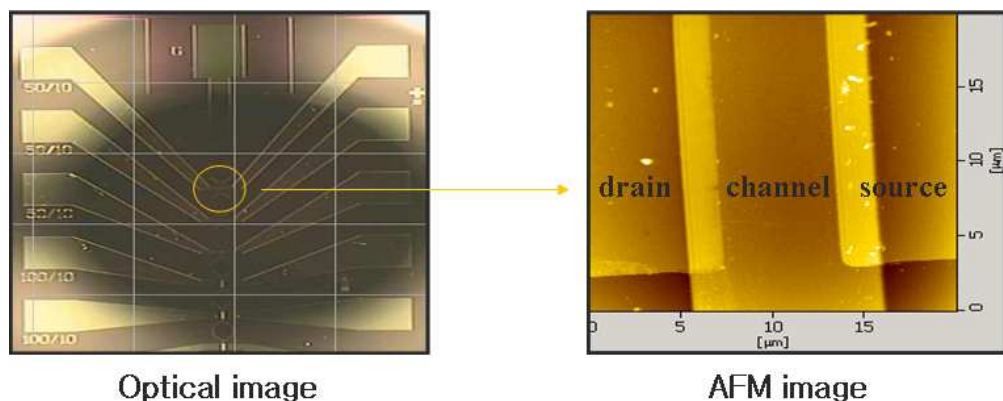
- [13] D. C. Look, K. C. Reynolds, J. R. Sizelove, J. L. Jones, C. W. Litton, G. Cantwell, and W. C. Harsch, *Solid State Commun.*, 105, 399 (1998)
- [14] Y. Chen, D. M. Bagnall, K-J. Koh, K-T. Paᄁ, K. Hirage, Z-Q. Zhu, T.Yao, *J. Appl. Phys.*, 84, 3912 (1998)
- [15] P. Fons, K. Iwata, S. Niki, A. Yamada, and K. Matsubara, *J. Cryst. Growth*, 201, 627 (1999)
- [16] J. Narayan, K. Dovidenko, A. K. Sharma, and S. Oktyabrsky, *J. Appl. Phys.*, 84, 2597 (1998)
- [17] Y. R. Ryu, S. Zhu, D. C. Look, J. M. Wrobel, H. M. Jeong, and H. W. White, *J. Cryst. Growth*, 216, 330 (2000)
- [18] T. Aoki and Y. Hatanaka, *Appl. Phys. Lett.*, 76, 3257 (2000)
- [19] M. Kawasaki et. al., *Mat. Sci. Eng. B56*, 263(1998)
- [20] Y. Oumi et. al., *Jpn. J. Appl. Phys.* 38, 2603(1999)
- [21] A. N. Mariano and R. E. Hanneman, *J. Appl. Phys.* 34 384(1963)
- [22] K. Vanheusden, C. H. Seager, W. L. Warren, D. R. Tallant and J. A. Voigt, *Appl. Phys. Lett.* vol. 68, pp. 403-405, Nov. 1996.
- [23] G. J. Jin, S. H. Bae, S. Y. Lee, S. Im, *Mater. Sci. Eng. B*, vol. 71, pp. 301-305, Feb. 2000.
- [24] K. Vanheusden, W. L. Warren, C. H. Seager, D. R. Tallant, J. A. Voigt, *J. Appl. Phys.* vol. 79, pp. 7983-7990, May. 1996.
- [25] Sun Yuming, Xu Pengshou, Shi Chaoshu, Xu Faqiang, Pan Haibin and Lu Erdong, *J. Electron Spec & Related Phenomena*, 114-116, 1123, (2001)



## 제 2장 실험 방법

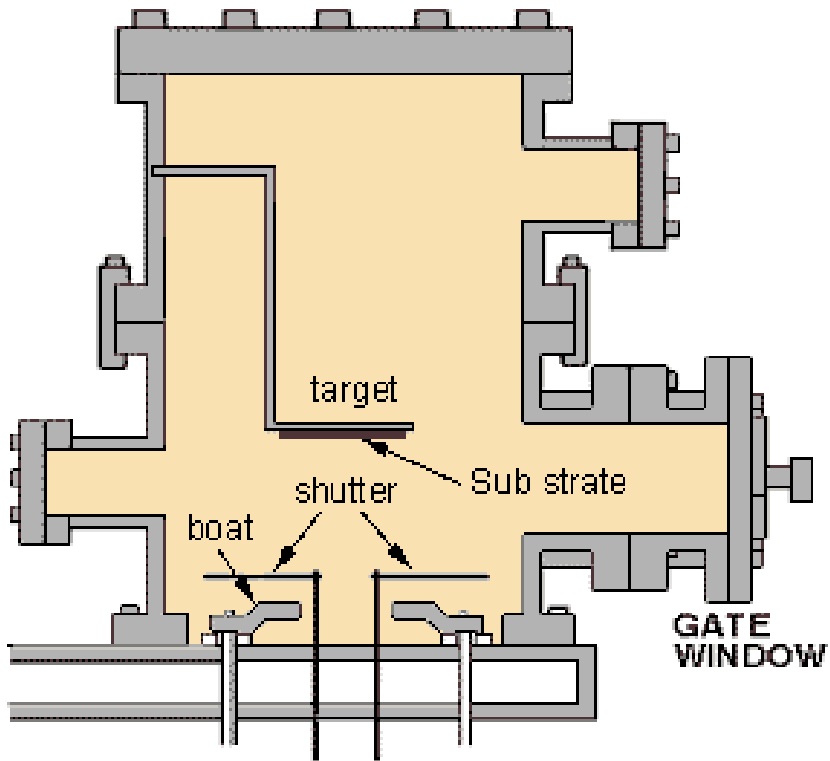
### 2.1 전극 증착

본 실험에서는 Si(100) 기판위에 bottom gate 형태로 300 nm 두께의 Al을 전극으로 사용하였다. 전극 증착 전에 기판을 아세톤과 메탄올 용액에 초음파 세척기로 5분간 유기세척한 후  $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$  (1:1:3) 용액에서 표면처리하고 HF를 이용하여 기판위에 자연 산화막을 제거한 후,  $\text{N}_2$  가스로 세척한 기판을 건조시켰다. Photolithography를 통해 TFT의 채널 폭(W)은  $250 \mu\text{m}$ , 채널 길이(L)는  $50 \mu\text{m}$ 의 TFT 마스크를 이용하여 전극 패턴을 만들었다. 전극은 Thermal evaporator를 이용하여 증착시켰다. gate 전극 형성하고, LTO(Low Temperature Oxide)를 절연체로 증착한 후 gate 전극과 같은 방법으로 Source Drain 전극을 Thermal evaporator를 이용하여 증착시켰다. [그림 2.1]은 전극, 절연층, 채널층 모두 형성 후 전극의 모습이다.



[그림 2.1] 전극형성 후 이미지

Thermal evaporation은 고진공 상태에서 전기 필라멘트를 이용해 보트를 가열하여 그 위에 고체 상태의 소스 재료를 녹여 기화시켜 증발된 원자가 보다 낮은 온도를 유지하고 있는 기판 위에 응축되어 박막을 형성시킨다. Thermal evaporation의 구조는 [그림 2.2]과 같이 boat에 증착시킬 금속을 두고 substrate에 기판을 장착 시킨 뒤 고진공 상태에서 pre-evaporate 한 후 shutter를 열어 증착한다.



[그림 2.2] Thermal evaporation

## 2.2 ZnO 박막 증착

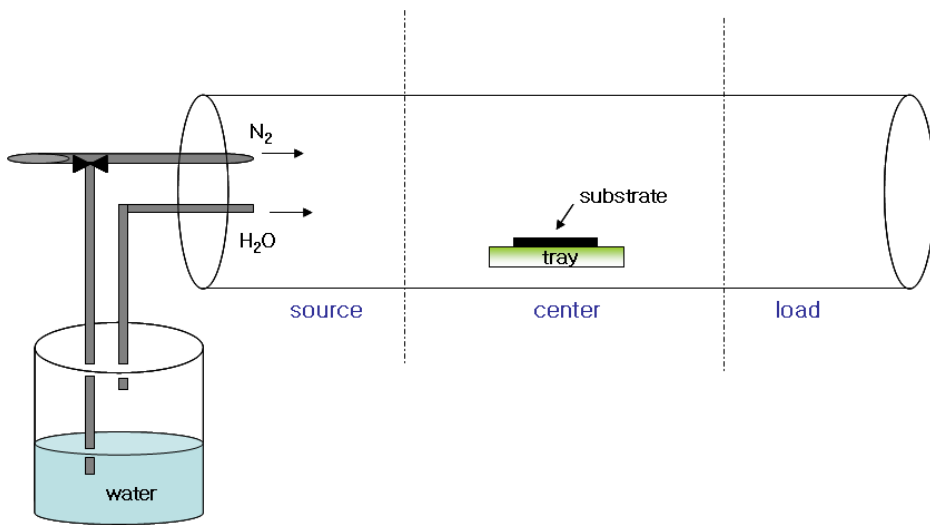
gate 전극 증착 후 RF - Sputter 장비를 이용하여 ZnO 박막을 증착하였다. 세척 후 Sputter 장치에 시료를 장착하고, target으로는 ZnO(4N)를 사용하였으며, Sputtering gas는 Ar을 사용하였다. 증착전 챔버내의 진공도는 약  $10^{-5}$ Torr까지 유지하였다. 증착은 상온(300K)에서 이루어졌고, Ar gas는 70 sccm, RF power는 200 W, 증착압력은 5 mTorr로 유지하였다. 증착시간은 5분, 10분, 15분, 20분, 30분, 60분으로 각각 증착하였고, 두께 측정은 박막 두께 측정기(Dektak 3st)를 통해 측정하였다. 증착하기 전 ZnO target 표면의 오염을 제거하기 위해 1시간정도 예비 스퍼터링 후 셔터를 열고 증착하였다. 증착조건은 [표 2.1]와 같다. 그리고 두께 측정은 박막 두께 측정기(Dektak 3st)를 통해 측정하였다.

system	target	Ar	RF power	working pressure	deposition time (min)	thickness (nm)
RF sputter	ZnO(4N)	70 sccm	200 W	7 mTorr	5	30
					10	55
					15	96
					20	150
					30	180
					60	300

[표 2.1] ZnO 증착 조건

## 2.3 Annealing

증착 후 thermal oxidation furnace로  $N_2$  분위기에서  $300\text{ }^\circ\text{C}$ , 2시간 동안 후속 열처리하였다. 먼저 열산화로 내부에 분위기 가스를 흘려주고 열처리하고자 하는 온도까지 올라가면 입구를 열고 시료를 장착하여 열처리 하였다. 열산화로 구조는 [그림 2.3]과 같은 구조로 되어있다.

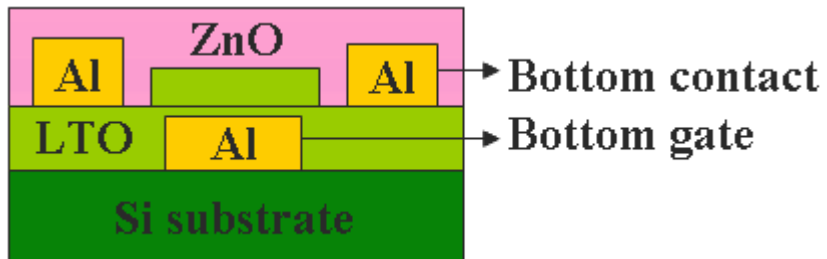


[그림 2.3] 열산화로(thermal oxidation furnace)의 구조

[표 2.2]의 조건대로 모두 증착 후 ZnO-TFT의 대략적인 구조는 [그림 2.4]이다.]

gate	Al (300nm)
Insulator	LTO (300nm)
metal	Al (300nm)
channel	ZnO (30~300nm)

[표 2.2] ZnO-TFT 증착 조건



[그림 2.4] ZnO-TFT 구조

## 2.4 Sputter

### 2.4.1 Sputtering

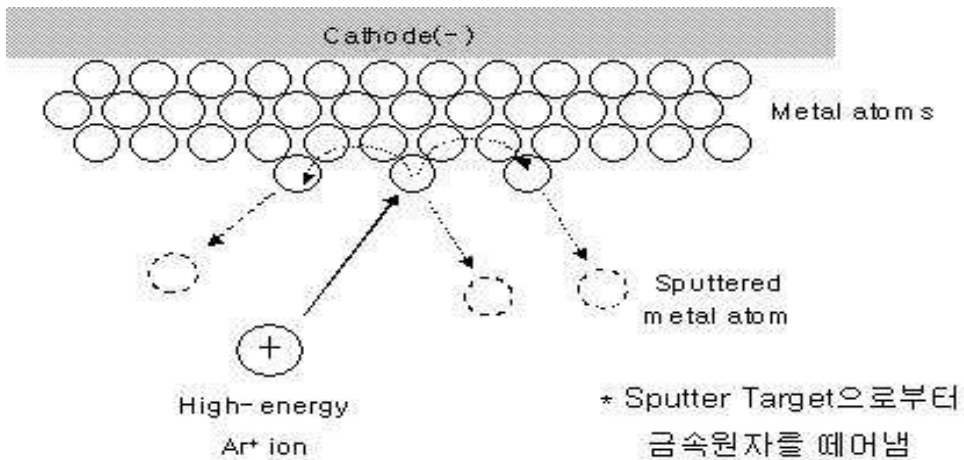
스퍼터링(sputtering) 현상은 1852년 Grove에 의하여 처음 발견되었으며 [1], 현재는 여러 가지 박막의 형성에 광범위하게 사용되어지고 있다. 스퍼터링은 높은 에너지(>30 eV)를 가진 입자들이 target에 충돌하여 target 원자들에게 에너지를 전달해 줌으로써 target 원자들이 방출되는 현상이다[그림 4]. 이러한 스퍼터링은 단순한 한번의 충돌로는 발생하지 않으며 보통 여러 번의 충돌이 일어나는 결과로 발생하게 되며 스퍼터링 과정중 기판 표면에 충돌하는 입자들은 불활성기체(He, Ne, Ar, Xe 등)를 사용하는데 가장 많이 사용되는 것은 Ar 기체이다. 만일 충돌하는 원자들이 양의 이온(positive-ion)이라면 cathodic sputtering이다. 보통 스퍼터링에는 양의 이온이 많이 사용되는데, 그 이유는 양의 이온은 전기장(electric field)을 이가해 줌으로써 가속하기가 쉽고 또한 target에 충돌하기 직전 target에서 방출되는 Auger 전자에 의하여 중성화 되어 중성 원자로 target에 충돌하기 때문이다.

### 2.4.2 Sputtering의 원리

스퍼터링은 [그림 2.5]에서와 같이 이온의 가속, 이온의 target에의 충돌 그리고 target 원자 방출의 3가지 과정을 통해서 일어난다. 입사하는 이온은 상당히 큰 에너지(20~30 eV)를 가지고 있어야만 target 원자를 방출시킬 수가 있는데, 이는 곧 스퍼터링이 일어나기 위한 문턱 에너지(threshold energy)가 존재한다는 것을 의미한다. 참고로 보통 금속 원자

한 개가 승화하는데 필요한 에너지가 3~5 eV인데, 이에 비하면 20~30 eV는 상당히 큰 값이다. 이는 대부분의 에너지가 열로 방출되고 극히 일부의 에너지만이 스퍼터링에 이용된다는 것을 의미한다. 문턱 에너지보다 작은 에너지를 가지고 입사하는 이온들은 target 원자들을 원래의 위치에서 이동시키거나 target 원자에 에너지를 전달하여 확산시킬 수 있다. 스퍼터되어 나간 원자의 주변에 있던 원자들도 원래의 위치에서 이동되거나 확산되기도 한다.

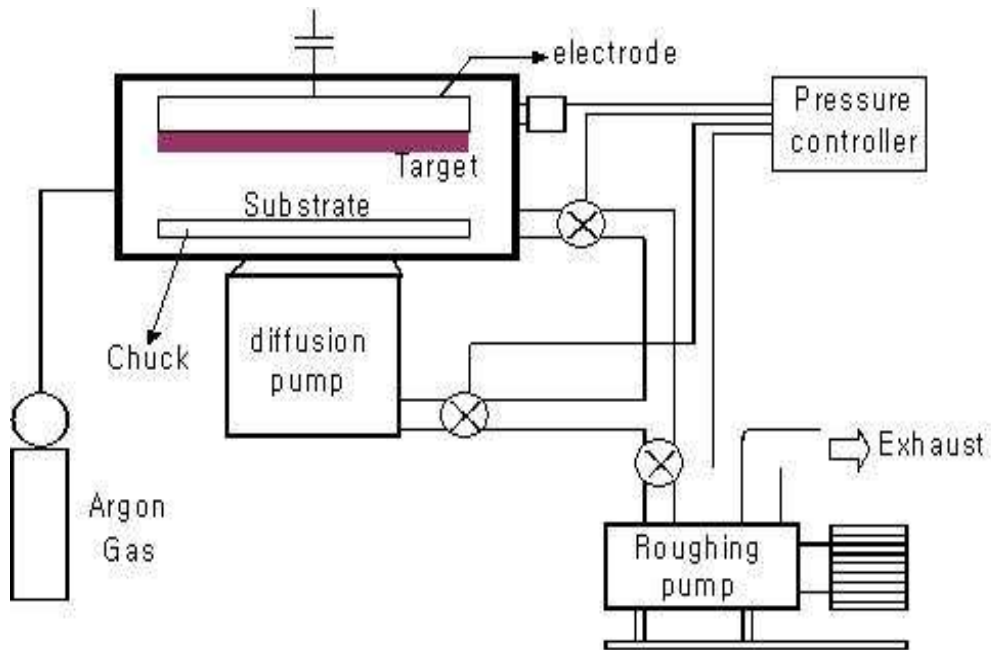
낮은 에너지를 가진 입사 이온들은 binary 또는 ternary 충돌을 통하여 target 표면으로부터 산란된다. 산란되는 이온의 비율은 이온의 에너지, 이온 질량  $m_i$ 에 대한 target 원자의 질량  $m_t$ 의 비에 의해서 좌우된다.  $m_t/m_i$ 의 비가 1에서 10으로 증가함에 따라 fraction은 0.01에서 0.25로 증가한다.



[그림 2.5] Sputtering의 원리

예를 들어 500 eV의 에너지를 갖는 Ar이온이 Ti 및 Au원자들에 충돌할 경우 scattering coefficient는 각각 0.01과 0.18이다. 모든 입사된 이온들은 target 표면에서 중성 원자로 되며, 중성 입자으로써 산란되면서 target 표면의 원자 층에 변형을 일으키면서 점차 그들의 에너지를 잃는다. 동시에 target 원자들에 의하여 산란된다. 입사된 입자들 중 몇몇은 target으로부터 방사(emit)되기도 한다. 입사된 입자에 의하여 제자리에 이탈되었던 target 원자들의 일부는 target 표면으로 확산되거나 그들의 에너지가 결합 에너지를 극복할 정도로 매우 큰 경우에는 스퍼터링된다. 입사된 입자에 의하여 제자리에 이탈되었던 target 원자들의 일부는 target 표면으로 확산되거나 그들의 에너지가 결합 에너지를 극복할 정도로 매우 큰 경우에는 스퍼터링된다. 이때 target 원자들끼리도 운동량을 교환하기도 한다. 한편 매우 큰 에너지를 가진 이온들은 target 표면에서 중화되어 target 내부로 주입(implant)되기도 한다. Target에서 스퍼터되어 떠나는 원자들은 활성화된 또는 이온화된 상태로 target을 떠나기 때문에 반응성(reactive) 스퍼터링이 가능하다. 처음에 target 내부로 주입되었던 이온(중성 원자)은 target이 스퍼터링 되면서 닳게 되기 때문에 결국 target으로부터 스퍼터 되어 방출된다. [그림 2.6]는 Sputter의 구조를 보여준다.





[그림 2.6] Sputter의 구조

## 2.5 ZnO 박막 분석

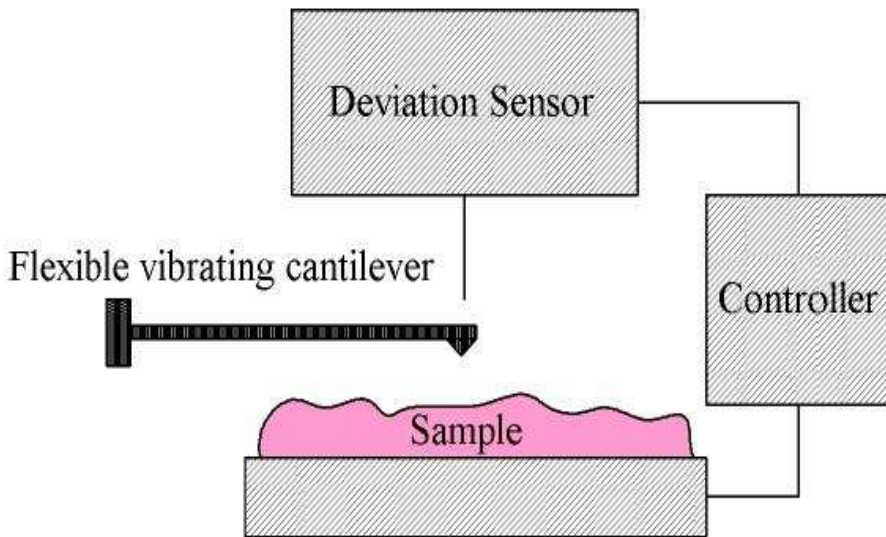
본 실험에서 ZnO 박막의 구조적 특성은 AFM과 X-ray diffraction(XRD)를 통해 측정하였다. TFT의 전기적인 특성은 반도체 계수 분석기(Agilent 4155C)를 이용하여 측정하였다.

### 2.5.1 AFM(Atomic Force Microscope)

AFM(Atomic Force Microscope)이란 force sensing tip과 sample의 표면 사이에 작용하는 원자 간의 힘에 의한 캔틸리버(cantilever)의 굽힘을

이용하여 원자 수준에서 물질의 표면 특성을 힘의 3차원 topography를 영상화하는 기구로 [그림 2.7]과 같다. AFM은 시료의 전기적인 특성과 무관하므로 도체, 반도체 및 부도체등 모든 시료의 분석에 범용 적으로 적용되고 있다. AFM에서는 마이크로 머시닝으로 제조된 캔틸레버라고 불리는 작은 막대를 쓴다. 캔틸레버 끝 부분에는 뾰족한 바늘이 달려 있으며, 이 바늘의 끝은 원자 몇 개 정도의 크리로 매우 첨예하다. 이 탐침을 시료 표면에 접근시키면 탐침 끝의 원자와 시료 표면의 원자 사이에 서로의 간격에 따라 인력이나 척력이 작용한다.

이러한 AFM에는 대표적으로 두 가지 모드가 있는데 접촉모드(contact mode)와 비접촉모드(non-contact mode)로 나뉘어 진다.



[그림 2.7] AFM 구조

접촉모드의 AFM에서는 척력이 작용하는데 그 힘의 크기는 1~10 nN 정도로 아주 미세하지만 캔틸레버 역시 아주 민감하므로 그 힘에 의해 휘어지게 된다. 이 캔틸레버가 아래위로 휘는 것을 측정하기 위하여 레이저 광선을 캔틸레버 윗면에서 반사된 광선의 각도를 광검출 다이오드(photodiode)를 사용하여 측정한다. 이렇게 하면 바늘 끝이 0.01 nm 정도로 미세하게 움직이는 것까지 측정해낼 수 있다. 바늘 끝의 움직임을 구동기에 전달(feedback)하여 AFM의 캔틸레버가 일정하게 휘도록 유지시키면 탐침 끝과 시료 사이의 간격도 일정해지므로 STM의 경우에서와 같이 시료의 형상을 측정해낼 수 있다.

비접촉모드의 AFM에서는 원자사이의 인력을 사용하는데 그 힘의 크기는 0.1~0.01 nN 정도로 시료에 인가하는 힘이 접촉모드에 비해 훨씬 작아 손상되기 쉬운 부드러운 시료를 측정하는데 적합하다. 원자간 인력의 크기가 너무 작아 캔틸레버가 휘는 각도를 직접 잴 수가 없기 때문에 비접촉모드에서는 캔틸레버를 고유진동수 부근에서 기계적으로 진동시킨다. 시료표면에 다가가면 원자 간의 인력에 의해 고유진동수가 변하게 되어 진폭과 위상에 변화가 생기고 그 변화를 락-인 앰프(lock-in amp)로 측정한다. 원자 간에 상호 작용하는 힘은 시료의 전기적 성질에 관계없이 항상 존재하므로 도체나 부도체 모두를 높은 분해능으로 관찰할 수 있다. 캔틸레버라고 불리는 작은 막대 끝부분에 달려있는 탐침과 시료표면의 원자 사이의 힘에 의해 캔틸레버가 아래위로 휘게 되는데, 이때 레이저 광선이 캔틸레버 윗면에서 반사되는 각도를 포토다이오드로 측정함으로써 표면의 굴곡을 알아낸다.

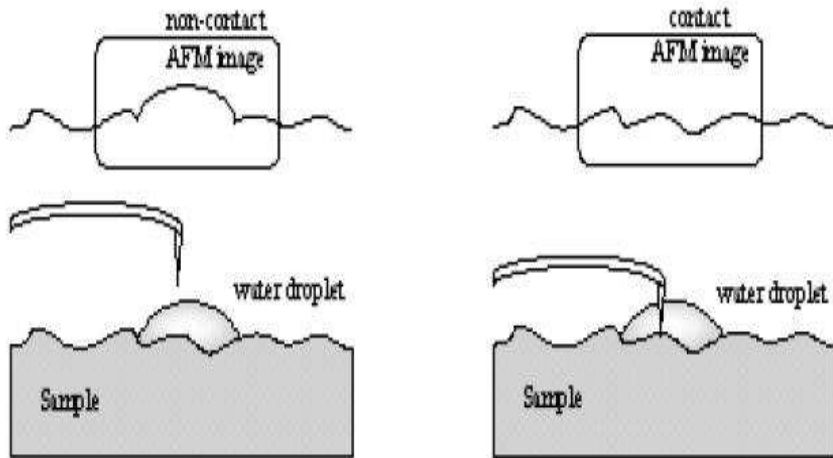
접촉모드의 AFM에서는 탐침이 시료의 표면과 접촉했을 때 캔틸레버가 받는 힘은 시료의 표면에 수직하게 반발력을 받는다. 이러한 반발력은 시료와 탐침 끝에 있는 원자 사이의 거리가 매우 가까울 때에만 적용하며,

거리에 따라 그 힘의 크기가 변하게 된다. 따라서 AFM을 접촉모드에서 작동 시에 탐침과 시료 사이의 거리가 매우 작기 때문에 수평분해능 (lateral resolution: 탐침과 시료 사이의 거리와 탐침의 유효반경에 의해 결정)이 매우 좋다. 하지만 접촉모드에서 탐침이 시료 표면에 양전압을 인가한다. 만약 탐침이 시료 표면에 인가하는 힘이 시료표면의 원자 또는 분자들의 결합을 파괴할 수 있을 정도라면 측정하는 동안 시료가 손상될 수 있으며, 표면의 형상을 계속 변화 시키므로 원래 표면 형상을 측정하기는 어렵다. 따라서 캔틸레버의 스프링상수(spring constant) ( $k$ )를 매우 작은 값을 선택한다면, 탐침이 시료 표면을 지나갈 때 탐침이 받는 힘의 대부분이 캔틸레버가 휘어짐으로 나타나며 시료의 변형을 상대적으로 줄일 수 있다. 그러면 캔틸레버의 휘어지는 정도의 변화는 전적으로 표면의 굴곡변화에서 기인한다고 볼 수 있다.

또한 접촉모드에서 무시할 수 없는 힘은 탐침이 시료에 인가하는 수평 힘(lateral force)이다. 이러한 수평 힘은 탐침이 시료에 인가하는 수직 힘(vertical force)과 탐침이 스캔(scan)하는 속도에 관계된다. 즉, 캔틸레버에 인가한 힘(set-point or scan force)이 크면 클수록 수평 힘은 증가하며, 스캔속도가 증가하면 커진다. 따라서 시료가 받는 수직 및 수평 힘은 접촉 AFM 영상에 직접적인 영향을 준다고 할 수 있다. 따라서 가능한 시료가 받는 힘을 줄이기 위해 접촉모드에서는 캔틸레버 스프링 상수를  $1 \text{ N/m}$  이하로 하는 것이 좋다. 물론 큰 구조를 갖고 딱딱한 시료인 경우에  $1 \text{ N/m}$  이상의 캔틸레버를 선택하여도 큰 구조는 쉽게 형상화할 수 있다. 하지만 미세한 구조가 변형 없이 형상화 되었다고 말하기는 어렵다. 일반적으로 접촉 AFM에서 원자단위의 미세한 구조를 형상화할 때는 Micro-lever ( $k = 0.01\sim 0.05 \text{ N/m}$ )가 적당하다. 그리고 캔틸레버에 인가하는 힘을 낮추고 이미지를 형상화하기에는 기술적인 한계가 있기 때문에

부드러운 시료인 경우에 비접촉모드 AFM이 적합하다.

접촉모드와 비접촉모드의 차이점을 쉽게 알아보기 위하여 각각의 모드를 사용한 AFM을 가지고 샘플을 측정했을 때 얻어지는 이미지의 차이를 [그림 2.8]에 나타내었다. 접촉모드에서 표현할 수 없는 물방울과 같은 부드러운 샘플의 표면 형상을 비접촉모드에서 표현 가능하다는 것을 알 수 있다.



[그림 2.8] 접촉모드와 비접촉모드의 AFM 이미지

## 2.5.2 XRD(X-ray Diffraction)

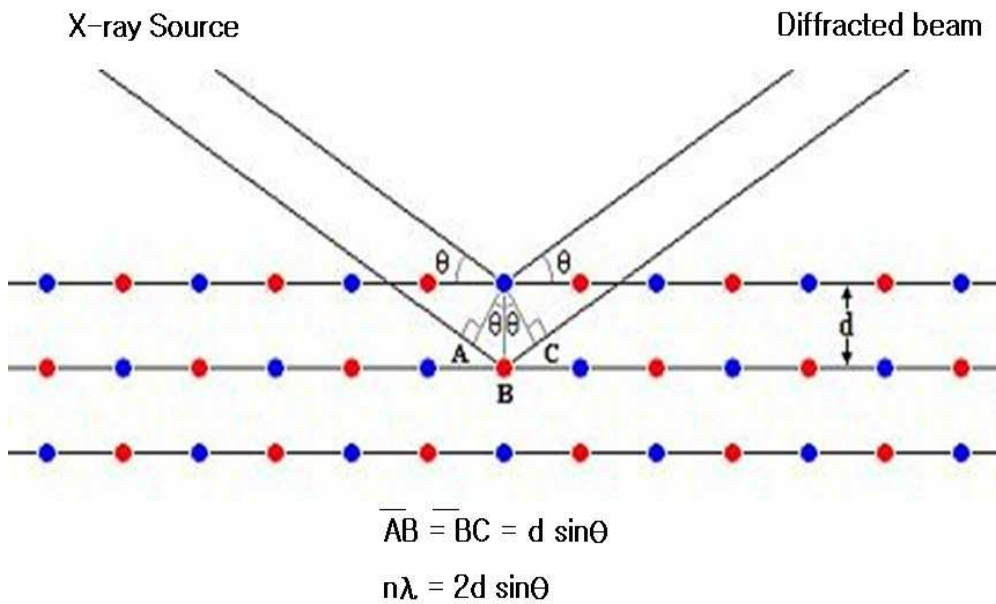
X-선은 1895년 독일의 물리학자 Rontgen이 진공관 실험도중 전자의 충돌

격에 의하여 금속 양극으로부터 발생하는 현상을 관찰하던 중 발견하였으며, 그 당시 그것이 무엇인지 모르지만 복사선 일 것이라고 생각하여 X-선이라 불렀다. 이것은 X선(X-Rays)의 파동성과 결정내 원자의 규칙적인 배열을 동시에 입증한 계기가 되기도 하였다. 같은 해 영국의 W.H. Bragg는 이를 다른 각도로 해석하여 Laue가 사용했던 수식보다 더욱 간단한 수식으로 회절에 필요한 조건을 Bragg's law ( $2 d \sin\theta = n\lambda$ ) [그림 2.9]로 나타내었으며, 이 X선 회절현상(X-Ray Diffraction)을 이용하여 각종물질의 결정구조를 밝히는데 성공하였다. 이후로 물질의 미세구조 연구에 X-선 회절이 널리 쓰이게 되었다.

현재 X-선을 이용하는 분석방법은 X-선 회절 분석과 형광 X-선 분석 등이 주로 쓰인다. 이중 X-선의 회절 현상을 이용하여 시료를 분석하는 장비가 X-선 회절 분석기(XRD, X-ray Diffraction)이다. X-선 회절 분석기는 특성 X-선을 분석하려고 하는 시료에 입사한 후 회절 되어 나온 X-선 빔의 각도를 검출하여 시료의 특성(결정구조, 화학결합구조, 정량 및 정성, 입자크기, 내부응력, 박막의 성장방향 및 구조, 산화물의 구조, 고분자 제품의 구성성분 등)을 분석하는 장비이다.

X-선 회절 분석기는 크게 3부분으로 이루어진다. 먼저 특성 X-선을 발생시키는 X-선 발생장치(X-ray generator), X-선 빔과 시료의 입사 각도를 조절해 주는 고니오미터(goniometer), 회절된 X-선 빔을 검출하는 검출기(detector)로 구성된다. 또한 X-선 회절 분석기는 분석하려는 시료의 종류와 용도에 따라서 여러 가지 다른 장비를 장착하여 사용이 가능하고, 이들 장비의 장착 유무가 분석한계를 좌우하기도 한다. 대표적 장비에는 박막 시료를 분석하는 thin film attachment, 온도 변화에 따른 실시간 시료 분석을 위한 high/low temperature 장비, text 및 stress 등을 측정하기 위한 장비 등이 있다.

보통 X-선 회절 분석기에 사용되는 특성 X-선은 0.5~2.5 Å 정도의 파장을 가지며 흔히 사용되는 물질은 Cu, Cr, Mo, Co의 특성 X-선이다. 분말의 X-선 회절에서는, 회절 무늬가 기록된다. 얻어진 회절 무늬의 가로축이 회절선의 피크 각도  $2\theta$ , 세로축은 회절강도  $I$  이다.



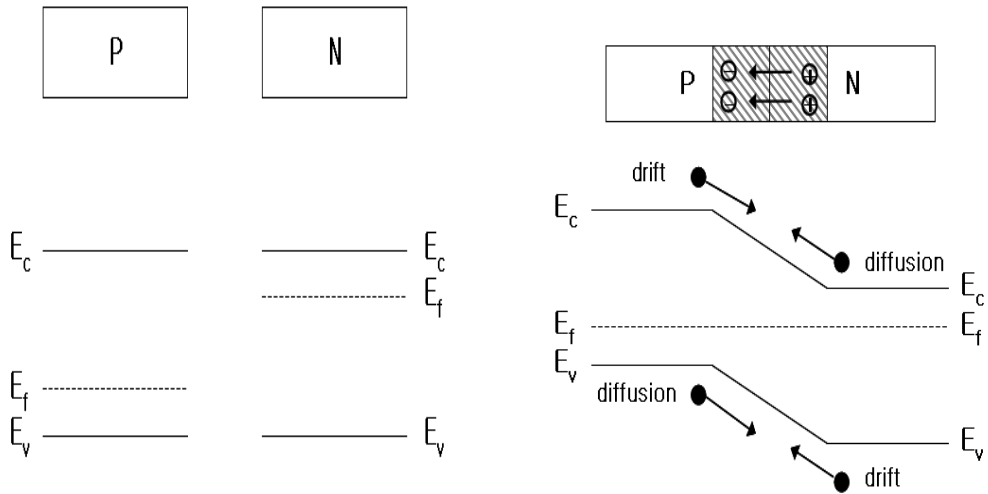
[그림 2.9] Bragg 법칙

### 2.5.3 I-V measurement

pn접합 다이오드는 각각 독립으로 존재해 있던 n형 반도체와 p형 반도체를 서로 접촉시켜 pn접합을 만들고 각 영역의 끝단에서 전압을 인가하도록 만든 것이다. 이것은 정류성의 성질을 가지고 있는데, 일반적으로 접합에 순방향 바이어스 전압을 인가하였을 때 전류는 전압의 크기에 따라 급격히 증가하고 역방향 바이어스 전압을 인가하였을 때부터 전류의 흐름은 정지된다.

[그림 2.10] (a)에서와 같이 독립해 있는 n형 반도체와 p형 반도체의 페르미 준위는 각각 전도대 및 가전자대 가까이에 있으며 캐리어를 공급하는 이온화된 불순물과 전기적인 중성 조건을 만족하고 있다. n형 반도체와 p형 반도체가 접촉되면 페르미 준위는 서로 어긋나게 되며, 접촉에 의해서 다수캐리어들은 접촉면을 건너 농도가 낮은 방향으로 확산해 간다. 이것에 의해서 확산 전위가 발생하면 에너지대가 약간의 기울기를 갖게 된다. 평형상태에 있는 반도체 내에서는 페르미 준위가 일정하기 때문에 에너지대의 기울기는 n형 및 p형 반도체 내부의 페르미 에너지가 일치하면서 [그림 2.10] (b)와 같이 평형상태를 이루게 된다. 이때 공핍층은 밴드의 기울기에 의해서 다수캐리어가 존재하지 않는다.





(a) pn 접합전의 페르미 레벨

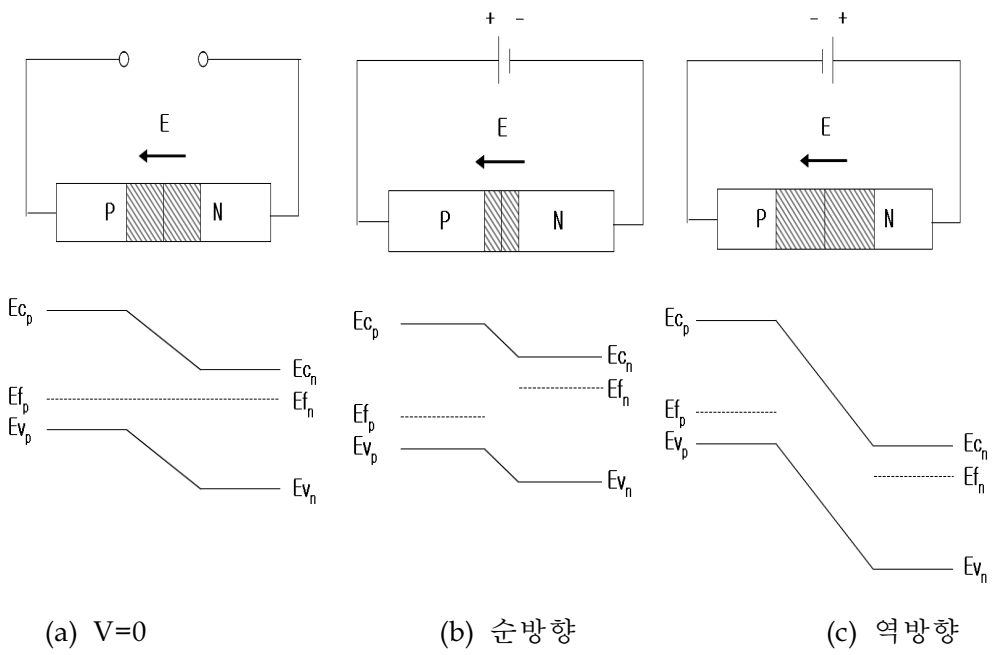
(b) pn 접합 후 페르미 레벨

[그림 2.10] pn 접합 전·후의 페르미 레벨

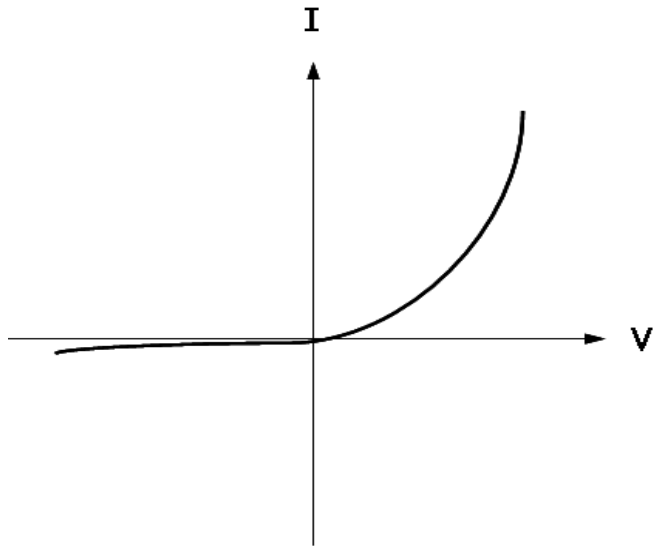
한편 캐리어농도의 기울기에 의한 캐리어의 확산은 페르미 준위와 전도대가 가전자대의 에너지 차의 변화에 의해서 발생한다. 열평형상태인 경우에는 에너지대가 기울어져 있어도 페르미 준위가 일정하면 전계의 효과와 확산의 효과가 조화되어 전류는 흐르지 않게 된다. 외부에서 순방향의 전압을 가해 전류가 흐르게 되면 공핍층 내에 있는 전자는 확산전압의 퍼텐셜을 넘게 된다. 이와 같이 접합면에서 전자나 정공의 흐름을 방해하도록 형성되는 전계를 퍼텐셜 장벽(potential barrier)이라고 부르며 결국 캐리어의 확산운동은 접촉전위차에 의한 퍼텐셜 장벽 때문에 억제된다. 이것은 정공에 대해서도 같은 방법으로 이해하면 된다.

pn접합에 전압을 인가하면 공핍층의 두께와 전류, 즉 캐리어의 이동은

전압의 방향에 따라서 서로 다른 특성을 나타낸다. [그림 2.11] (a)는 평형상태( $V=0$ ) 일 때이며, [그림 2.11] (b)는 p형 영역에 +, n형 영역에 -의 전압을 인가하면 확산전위에 의해 끌어들였던 전자와 정공은 확산전위의 영향이 적기 때문에 반대 영역으로 확산하고 그것에 의해서 전류가 흐르게 된다. 즉 순방향 바이어스가 걸리면 다이오드의 내부 전위장벽이 열평형 상태 때보다 낮게 되어 p형 중성영역에서의 다수캐리어인 정공이 공간전하영역을 통해 n형 중성영역으로 흘러들어간다. n형 반도체에서는 정공을, p형 반도체에서는 전자를 열평형상태에서의 농도 보다 증가시키는 주입작용을 한다. 반면 [그림 2.11] (c)와 같이 p형 영역에 -, n형 영역에 +의 전압을 인가하게 되면 순방향 바이어스 때와는 반대로 전위장벽이 높아지므로 다수캐리어의 확산이 열평형상태의 경우보다 감소하며 전위장벽이 충분히 높아지면 다수캐리어의 확산은 완전히 차단된다. 따라서 충분히 역방향 바이어스된 다이오드 전류는 전위언덕을 내려가는 소수캐리어만으로 구성된다고 할 수 있다. 즉 이 전압은 확산전위와 같은 방향으로 되어 소수캐리어를 끌어들여 공핍층의 폭을 더욱 넓혀 결국 전류가 흐를 수 없게 된다. 이와 같이 인가된 전압의 방향에 따라 전류의 성질을 표시한 것이 [그림 2.12]이다. [그림 2.13] I-V 측정 장비 모습이다.



[그림 2.11] 전압의 종류에 따른 에너지 레벨 변화



[그림 2.12] I-V 곡선



<Probe station>



<Semiconductor parameter analyzer>

[그림 2.13] I-V 측정 장비

## 2.6 참고문헌

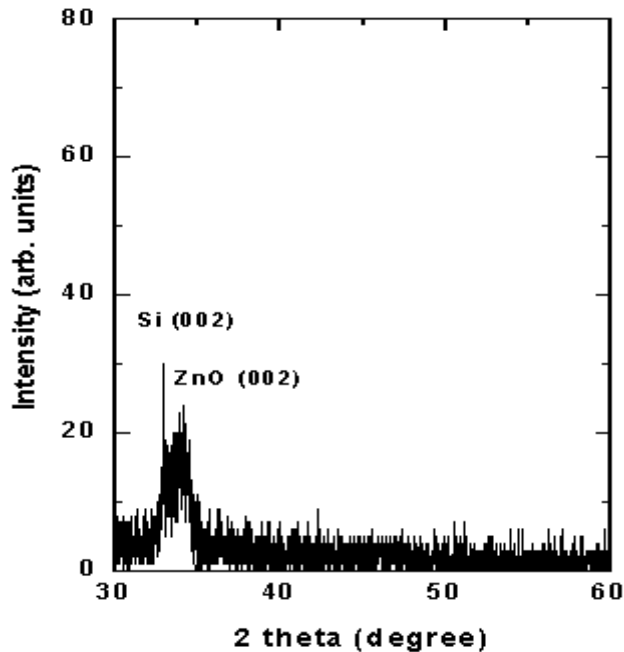
- [1] K. Kaiya, K. Omichi, N. Takahashi, T. Nakamura, S. Okamoto, H. Yamamoto, *Thin Solid Film* 409 116 (2002).
- [2] T. R. Albercht, S. Akamine, T. E. Carver, and C. F. Quate, *J. Vac. Sci. Technol*, A8, 3386 (1990)
- [3] H-J. Guntherodt and R. Wiesendanger, *Scanning Tunneling Microscopy 2*, Springer Series in Surface Science, 1992
- [4] J. Schneir and T.H. Mc Waid, "Design of an atomic force microscope with interferometric position control", *J. Vac. Sci. Technol. B* 12(6), Nov/Dec, pp. 3561~3566, 1994
- [5] L. Patrone, D. Nelson, V. I. Safarov, M. Sentis, W. Marine, and S. Giorgio, *J. Appl. Phys.* 87(8),3829 (2000)
- [6] Roger R. Lowe-webb, Hao Lee, Jay B. Ewing, Sandra R. Collins, Weidong Yang, and Peter C. Serel, *J. Appl. Phys.* 83(5), 2815(1998)

## 제 3 장 실험 결과

### 3.1 ZnO-TFT 구조적 특성평가

#### 3.1.1 XRD 결과

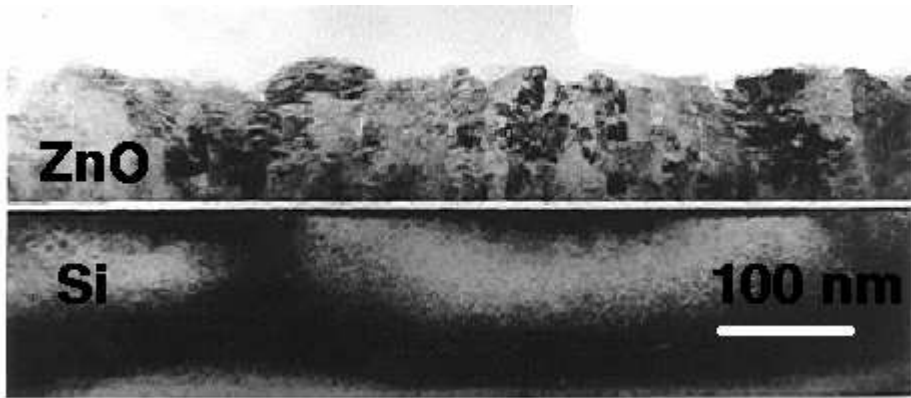
[그림 3.1]은 sputtering 법에 의해 상온에서 증착된 ZnO 박막의 XRD 스펙트럼이다.  $2\theta=34.4^\circ$  근방에서 하나의 피크 값이 나온 것은 hexagonal ZnO 결정구조의 (002)면에 의한 피크 값과 일치하는 값으로, (002) 결정면의 성장이 우월하게 진행되었음을 보여준다. 그리고  $2\theta=32.9^\circ$  은 Si(200)면으로부터 기판인 Si(100) 때문이다.



[그림 3.1] 실온에서 증착한 ZnO의 XRD

### 3.1.2 TEM 결과

[그림 3.2]는 100 nm 두께로 증착된 *as-dep* ZnO에서 자른 TEM 결과이다. 이것은 많은 마이크로성 결함과 거친 표면을 가진 다결정 ZnO를 보여준다. AFM으로부터 얻은 표면 거칠기는 2.8 nm이다.



[그림 3.2] 실온에서 증착한 ZnO의 TEM

### 3.1.3 AFM 결과

[그림 3.3]은 상온에서 증착된 ZnO 박막의 AFM 이미지이다.  $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ 의 스캐닝 영역에서 ZnO 박막 두께가 30 nm 일 때 결정립 크기는 92 nm, 박막 두께가 55 nm 일 때 결정립 크기는 143 nm, 두께가 96 nm 일 때 결정립 크기 124 nm, 두께 150 nm 일때 크기 98 nm, 두께 180 nm 일때 크기 112 nm, 그리고 두께 300 nm 일때 크기 154 nm로 두께가 가장 두꺼울 때 결정립 크기가 가장 크다.

	ZnO 30 nm	ZnO 55 nm	ZnO 96 nm
Image (1 $\mu\text{m}$ )			
RMS (nm)	1.68	3.49	2.81
Grain size (nm)	92	143	124

	ZnO 150 nm	ZnO 180 nm	ZnO 300 nm
Image (1 $\mu\text{m}$ )			
RMS (nm)	7.38	7.22	9.71
Grain size (nm)	98	112	154

[그림 3.3] 실온에서 증착한 ZnO 표면 AFM



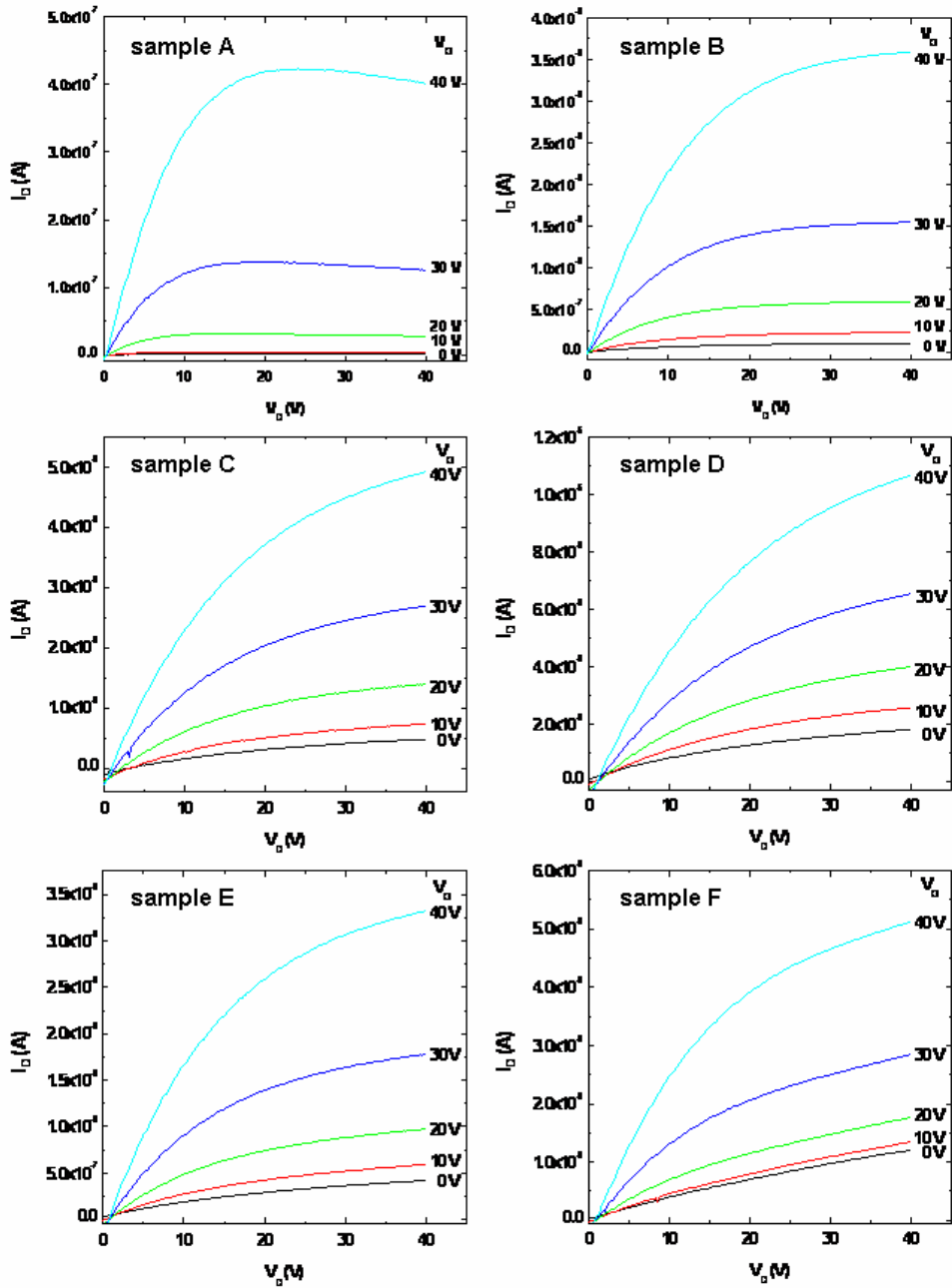
## 3.2 ZnO-TFT 전기적 특성평가

### 3.2.1 $I_D$ - $V_{DS}$ 결과

[그림 3.4]는 두께를 달리하여 상온에서 sputtering 법에 의해 증착된 ZnO를 활성 채널층으로 가지는 TFT의 전기적 특성을 보여준다. gate 전압( $V_G$ )의 변화(0 V - 40 V)에 따른  $I_D$ - $V_{DS}$  곡선이다. gate를 통해 측정된 전류-전압 특성으로 ZnO 채널이 n-type이라는 것을 알 수 있다. sample A는 ZnO 두께 30 nm, B는 55 nm, C, D, E, F는 각각 96, 150, 180, 300 nm이다. sample A, B는 off 상태에서 drain 전류가 거의 측정되지 않는 반면, sample C, D, E, F는 off상태에서 drain 전류가 여전히 측정된다. 이때, sample B의  $I_D$ - $V_{DS}$  곡선은 이상적인 TFT의  $I_D$ - $V_{DS}$  곡선에 가장 가까웠다. 문턱전압( $V_{th}$ )은  $I_D$ - $V_{DS}$  곡선에서  $I_D$ 의 제곱근의 곡선에서 직선부분의 기울기로 계산할 수 있다. 그리고 각각의 채널층의 두께에 따른 TFT의 포화 영역에서의 채널 이동도( $\mu_{sat}$ )는 아래의 식으로 구할 수 있다.

$$I_{DS} = \left( \frac{C_i \mu_{sat} W}{2L} \right) (V_{GS} - V_{th})^2 \quad (\text{for } V_{DS} > V_{GS} - V_{th})$$

여기서  $C_i$ 는 gate 절연체의 단위면적당 커패시턴스이다. 이식에서 얻은 채널 이동도와 문턱전압, 그리고 [그림 3.4]에서 얻은 누설전류의 크기를 [표 3.1]에 나타내었다. 채널층의 두께가 30 nm 일 때(sample A), 누설전류는  $8.45 \times 10^{-10}$  A 로 가장 작았지만 채널 이동도 값이  $0.04 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  로 낮았다. 채널층의 두께가 55 nm 일 때(sample B), 가장 안정적인 TFT 동작 특성을 보이고, 이때 off 상태에서 누설 전류가  $9.97 \times 10^{-8}$  A, 채널 이동도  $0.16 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ , 문턱전압 12.7 V의 값을 얻었다. 그러나 채널층의 두께가 55 nm 이상이 되면 누설전류가  $10^{-7}$  A,  $10^{-6}$  A로 증가하였다.



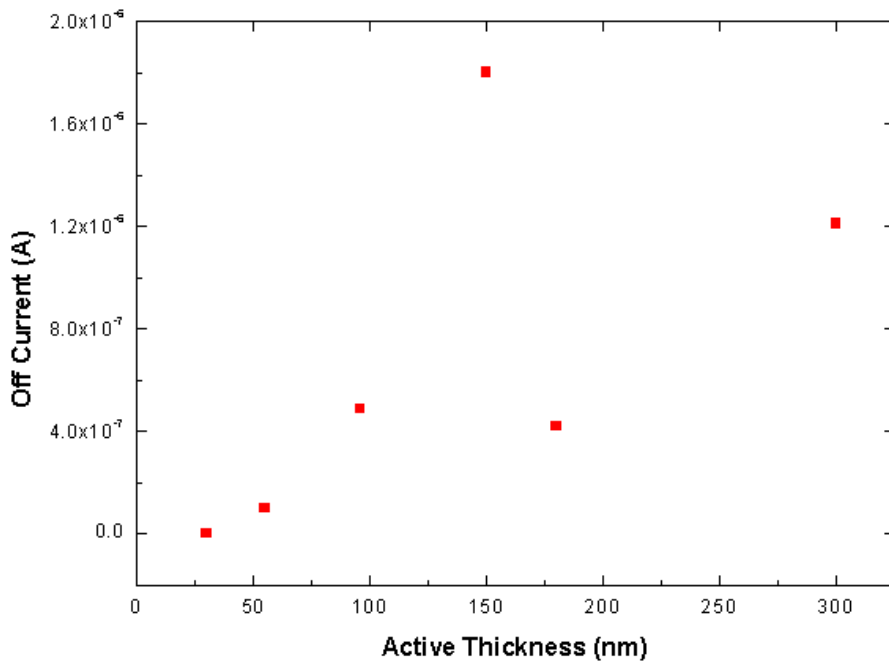
[그림 3.4] ZnO-TFT의  $I_D$ - $V_{DS}$  그래프

Sample ID	Thickness of channel layer (nm)	Leakage current (A) [ $V_G=0$ V, $V_S=40$ V]	$\mu_{\text{sat}}$ ( $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ )	$V_{\text{th}}$ (V)
A	30	$8.45 \times 10^{-10}$	0.04	15.8
B	55	$9.97 \times 10^{-8}$	0.16	12.7
C	96	$4.87 \times 10^{-7}$	0.14	10.1
D	150	$1.80 \times 10^{-6}$	0.17	10.2
E	180	$4.19 \times 10^{-7}$	0.07	13.2
F	300	$1.21 \times 10^{-6}$	0.26	16.5

[표 3.1] ZnO-TFT 전기적 특성

### 3.2.2 활성층 두께에 따른 누설전류

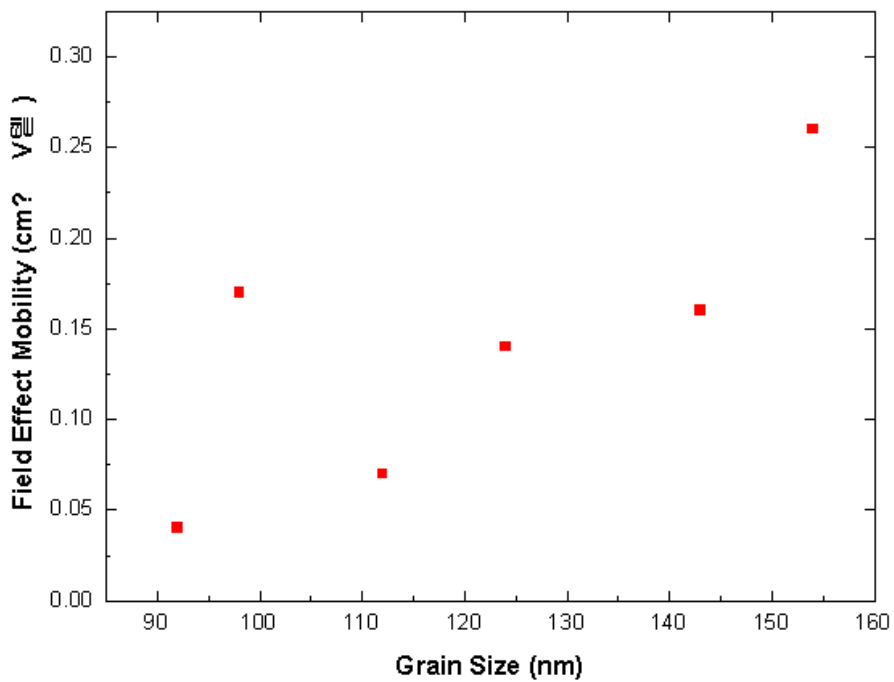
[그림 3.5]은 박막 두께에 따른 누설 전류 변화를 나타낸 것으로 ZnO 활성층 박막두께가 30 nm 일 때  $8.45 \times 10^{-10}$  A, 300 nm 일 때  $1.21 \times 10^{-6}$  A 이다. ZnO 두께가 180 nm 일 때를 제외하곤 박막 두께가 두꺼울수록 누설 전류도 함께 증가하는 양상을 보인다.



[그림 3.5] 활성층 두께에 따른 누설전류의 변화 그래프

### 3.2.3 결정립 크기에 따른 이동도

[그림 3.6]은 결정크기에 따른 Field Effect Mobility 변화를 나타낸 것으로 ZnO 활성층의 결정립 크기가 클수록 이동도가 증가함을 보여 준다.



[그림 3.6] 활성층 결정립 크기에 따른 Field Effect Mobility 변화

### 3.3 참고문헌

- [1] Y. Ohya, T. Niwa, T. Ban, Y. Takahashi, *Jpn. J. Appl. Phys. Lett.* **40**, 297 (2001)
- [2] S. Masuda, K. Kitamura, Y. Okumura, S. Miyatake, *J. Appl. Phys. Lett.* **93**, 1624 (2003)
- [3] R.L. Hoffman, B.J. Norris, J.F. Wager, *Appl. Phys. Lett.* **82**, 733 (2003)
- [4] E. Fortunato, P. Barquinha, A. Pimentel, A. Goncalves, A. Marques, R. Martins, L. Marques, *Appl. Phys. Lett.* **85**, 13 (2004)
- [5] E. Fortunato, P. Barquinha, A. Pimentel, A. Goncalves, A. Marques, L. Pereira, R. Martins, *Thin Solid Films* **487**, 205 (2005)
- [6] X.-Z. Bo, N. G. Tassi, C. Y. Lee, M. S. Strano, C. Nuckolls, Graciela B, Blancheta. *Appl. Phys. Lett.* **87**, 203510 (2005)
- [7] C. W. Chu, S. H. Li, C. W. Chen, V. Shrotriya, Y. Yang. *Appl. Phys. Lett.* **87**, 193508 (2005)
- [8] Q.J. Yao, D.J. Li. *J. Non-Chyst. Solids* **351**, 3191-3194 (2005)
- [9] P. Cosseddu, A. Bonfiglio. *Appl. Phys. Lett.* **88**, 023506 (2006)

## 제 4장 결론

본 논문에서는 Sputtering 법에 의해 상온에서 증착된 ZnO를 활성 채널층으로 사용하여 두께 최적화에 따른 ZnO-TFT의 동작특성을 연구하였다. 본 실험에서 사용한 TFT는 Si(100) 기판위에 bottom gate 형태로 300 nm 두께의 Al 전극을 사용하였고, gate 절연체로 300 nm 두께의 SiO<sub>2</sub>, source와 drain 전극으로 300 nm 두께의 Al을 사용하였다. TFT의 채널 폭(W)은 250  $\mu\text{m}$ 이고 채널 길이(L)는 50  $\mu\text{m}$ 로 하였다. 채널층으로 사용할 ZnO를 RF-sputtering 방법으로 상온에서 30 nm, 55 nm, 96 nm, 150 nm, 180 nm, 300 nm로 각각 증착하였고, 두께 측정은 박막 두께 측정기(Dektak 3st)를 통해 측정하였다. ZnO 증착 후 thermal oxidation furnace로 N<sub>2</sub> 분위기에서 300  $^{\circ}\text{C}$ , 2시간 동안 후속 열처리하였다. ZnO 박막의 구조적 특성은 XRD와 AFM을 통해 측정하였다고, TFT의 전기적인 특성은 HP4155를 이용하여 측정하였다.

최적의 박막 증착 조건을 위하여 스퍼터 증착으로 박막 두께를 변화시키면서 TFT 전기적 특성을 측정한 결과 박막 두께에 따라 30 nm에서는 0.038  $\text{cm}^2/\text{Vs}$ , 55 nm-150 nm 사이에서는 0.16  $\text{cm}^2/\text{V}$  그리고 300 nm에서는 0.26  $\text{cm}^2/\text{Vs}$ 의 채널이동도를 보였다. 그러나  $I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$  비는 10<sup>4</sup>에서 10으로 두께 증가에 따라 급속히 나빠졌다. field effect mobility는 결정립 크기에 따라 선형적으로 증가하고 있다. 또한  $I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$  비의 감소는 박막 두께 증가로 인한 누설 전류의 증가에 의한 것으로 보이며 박막 두께가 100 nm 이상이 되면 누설 전류가 1  $\mu\text{A}$  정도가 되며 박막 두께 증가에 대해 포화되는 경향을 보여 주고 있다. 이동도와  $I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$  비를 고려해 보면 현재 55 nm 두께가 제일 최적임을 알 수 있었다.

## 감사의 글

새내기로서 힘차게 새로운 세상에 발을 디딜 때가 엇그제 같은데 벌써 졸업을 앞두고 있습니다. 그 동안의 생활을 통해 보잘 것은 없지만 논문이라는 것을 쓰고 보니, 지금까지 저를 이 자리에 있게 해주신 많은 분들이 생각납니다.

우선, 진로에 대한 방향을 못 잡고 있던 저를 대학원으로 이끌어 주시고 자칫 안이할 수 있었던 시기를 끊임없이 발전할 수 있도록 많은 가르침과 격려를 아끼지 않으셨던 김홍승 교수님, 교수님은 저에게 발걸음도 닮고 싶은 멘토이십니다. 교수님 감사합니다.

지식 뿐 만 아니라 인생의 선배로써 조언과 따끔한 충고로 학생들을 이끌어 주시는 장지호 교수님, 물리학이란 다소 어려운 학문을 쉽게 다가갈 수 있게 해주신 이삼녕 교수님, 반도체 물리학과에서의 6년 동안 많은 지도와 관심을 가져 주셨던 양민 교수님, 안형수 교수님께도 이 글을 빌어 감사의 마음을 전합니다. 그리고 여러모로 부족한 언니 곁에서 동고동락하며 함께 해준 선여, 회사 생활과 병행하며 힘들었던 논문 준비를 자신의 일처럼 도와주고 다 포기하고 싶던 나에게 가장 큰 힘이 되어 준 선여야 고맙다. 실험실에 있는 동안 익숙지 않은 실험을 하나하나 세심하게 가르쳐준 은수, 주영이 언니, 현수 오빠, 명훈 선배, 많은 시간 고락을 같이 나눈 반도체 물리학과 선배, 후배들, 이 모든 분들의 관심과 성원이 지금의 저를 이 자리에 있게 해주었습니다. 아무쪼록 언제 어디서건 원하시는 바를 꼭 이루었으면 합니다.

제 대학생활에서 빼 놓을 수 없는 영어회화 동아리 사람들. 여기서 일일이 열거할 수는 없지만 항상 저를 믿고 지지해주는 이들의 아낌없는 사랑이 있기에 저는 언제나 행복했고 거기서 힘을 얻을 수 있었습니다.

10여 년 동안 따뜻한 마음을 나누며 격려와 우정으로 큰 힘이 되어준 내 자랑



스러운 친구들 유정, 윤정, 윤경, 연화, 준환. 이들과 함께 라면 아무리 힘든 일도 거뜬히 해쳐 나갈 수 있을 것입니다.

비록 글이지만 저의 진심을 담아 모두에게 감사의 마음을 전하고자 합니다.

끝으로 항상 동생 편에 서주는 든든한 나의 오빠, 무한한 사랑과 희생으로 뒷바라지 해주신 어머니. 오늘이 있기까지 누구보다도 아껴주시며 저를 믿고 묵묵히 지켜봐 주신 아버님, 함께 있었음 가장 기뻐해 주셨을 사랑하는 아버지의 은혜에 감사드리며 이 작은 결실을 바칩니다.

2008년 2월

정재현