저온 박막 공정으로 제작된 Au 적층형 다층 투명전극의 결정성장 거동과 광-전기적 특성

논 문
60-2-20

Study on the Crystal Growth Behavior and Opto-Electrical Properties of Transparent Conducting Oxide Films with Au-Interlayer Fabricated by Using a Low-temperature Process

지영석* · 최용** · 이상현†
(Young-Seok Ji · Yong Choi · Sang-Heon Lee)

Abstract - Transparent conducting oxide films like ITO/Au/ITO and AZO/Au/AZO were fabricated with a sputter at a low-temperature of less than 70°C and their crystallization and opto-electrical properties were studied. X-ray diffraction showed that single-ITO layer was amorphous, whereas, ITO of ITO/Au/ITO multi-layer was crystal. The ITO crystallization and its orientation depended on Au crystallization. Surface roughness of the ITO-multi-layers were in the range of 29-88% of that of ITO-single layer. ITO on amorphous gold layer had more rough surface than ITO on crystal gold. The gold layer between ITO improved electrical conductivity. Carrier density, mobility, resistivity and sheet resistance of ITO-single layer were $2.3 \times 10^{19}/\text{cm}^3$, $85 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $31 \times 10^{-4} \Omega \text{ cm}$, and $310 \Omega/\text{cm}^2$, respectively. Those of ITO/Au/ITO-multi-layers depended on Au-interlayer-thickness, which were in the range of $3.6 \times 10^{19} \sim 4.2 \times 10^{21}/\text{cm}^3$, $43 \sim 85 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $0.17 \times 10^{-4} \sim 25 \times 10^{-4} \Omega \text{ cm}$, and $1.7 \sim 20 \Omega/\text{cm}^2$, respectively. The sheet resistances of the single-layer ITO and the multi-layer ITO were 310 and $2.7 \sim 21 \Omega/\text{cm}^2$, respectively. That of AZO/Au/AZO was $8.6 \Omega/\text{cm}^2$, which was better than the single-layer ITO.

Key Words : Transparent conducting oxide films, ITO/Au/ITO, AZO/Au/AZO, Sheet resistance

1. 서 론

터치패널(touch panel), 플렉시블 디스플레이(flexible display), 플렉시블 태양전지(flexible photovoltaic cell)의 급격한 사용 증가로 폴리머 기판(polymer substrate)에 투과성 전도막의 증착한 투명 전극의 성능 개선에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.[1-3] 기존의 투명전극은 가시광에 대하여 광 투과도가 크고, 전기전도도가 높은 박막이며 일반적으로 가시광 영역대에서 80%이상의 투과율과 $1 \times 10^{-4} \Omega \text{ cm}$ 이하의 비저항을 갖는 소재로서, 산화주석(tin oxide), 산화인듐(indium oxide, In_2O_3), 산화인듐주석(indium tin oxide, ITO), 비소 첨가 산화주석(antimony doped tin oxide, ATO), 산화아연(zinc oxide, ZnO), 산화인듐(zinc indium doped zinc oxide, IZO), ZnO 에 알루미늄(Al)을 첨가한 AZO 박막과 Ga를 첨가한 GZO 박막이 개발되어 있다.[4-6] 이들 박막의 제조 방법은 스퍼터(sputter)법, 펄스레이저 스퍼터법, 이온빔 디포지션(in beam deposition)으로 수행되는데 대부분의

증착온도가 150°C 부근이어서 폴리에틸렌폴리에테르술폰(poly ether sulfone, PES) 또는 폴리에틸렌테레프탈레이트(poly ethylene terephthalate, PET)의 기판에 열변형을 주기 때문에 저온 공정에서 수행될 필요가 있다.[4-6]

한편, 매우 얇은 금속박막은 가시광선 영역의 빛은 투과하고 적외선 영역의 빛은 반사하는 광학적 특성을 가지고 있어서 투명 절연 박막과 투과성 전기전도막으로 이용할 수 있다. 예로, $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Au}/\text{Bi}_2\text{O}_3$ 와 같은 산화물/금속/산화물의 샌드위치 구조에서 금속 박막층은 반사광을 재 반사시키는 상부막을 형성시키고, 산화물 박막은 반사 억제층(antirejection coating) 역할을 하여 가시광선의 광 투과율을 증진시킨다.[7] 금속박막의 광학적 성질은 결정 결함, 응력 및 자유전자 밀도에 의존한다. Ag의 경우 모든 가시광선 영역에서 빛을 거의 흡수하지 않으므로 무색을 띠지만 Au, Cu의 경우는 노란색 영역을 흡수하므로 노란 빛깔을 띠게 되어 외관상 Ag에 비하여 좋지 않고 Ag의 비저항이 가장 낮다.[8, 9] 그러나 Ag를 층간막으로 사용한 ITO/Ag/ITO는 350°C 이상의 온도에서 내구성이 없으며 상온에서 대기중 방치할 경우 열화현상이 발생하는 문제가 있다.[10] 따라서 본 연구의 목적은 ITO/Au/ITO와 AZO/Au/AZO 박막을 저온 공정으로 제조하고 박막의 금상학적 조직 평가와 전기적 특성을 평가함으로써 투명 전도막의 전기적 특성을 향상시킨 투명전극을 개발하는데 있다.

* 비 회 원 : 선문대 공대 금속재료공학과 석사과정

** 비 회 원 : 선문대 공대 전자재료공학과 교수

† 교신저자, 정회원 : 선문대 공대 전자공학과 교수

E-mail : shlee@sunmoon.ac.kr

접수일자 : 2010년 12월 13일

최종완료 : 2010년 12월 27일

2. 실험 방법

ITO 박막, AZO 박막, Au 박막은 High purity Chemicals Corporation에서 제작된 ITO target (순도 99.99% In_2O_3 -10% SnO_2)과 AZO target(Al dopend ZnO Al_2O_3 3WT%,순도 99.99%), Au target(순도 99.95%)을 사용하여 증착하였다. 기판은 두께 100- μm 의 PET 기판을 1X1, 2X2, 3X3 cm^2 의 크기로 자른 후 사용하였다. 기판의 세척은 IPA(isopropyl alcohol)를 사용하여 초음파 세척을 30분간 수행하고 질소로 건조시켰다. ITO/Au/ITO와 AZO/Au/AZO 다층 박막의 증착은 3개의 스퍼터건(sputtering gun)이 120° 간격으로 위치한 RF magnetron sputter 장치 (Jisan, Korea)와 평판형 DC magnetron sputter (Jisan, Korea)를 사용하였다. RF magnetron sputter의 gun에 RF(13.56 MHz)를 인가하여 진공상태를 유지하면서 ITO 박막을 증착시키고 증착이 끝난 시편은 다시 평판형 DC magnetron sputter 장치의 gun에 Au target을 장착하여 진공상태에서 증착시켰다. 이렇게 적층된 박막을 다시 RF magnetron sputter 장치로 ITO를 증착시켜 ITO/Au/ITO 다층 박막을 완성시켰다. 진공은 로터리 펌프(rotary pump, csp-200, Japan)와 터보펌프(turbo molecular pump, cst-500, Japan)를 사용하여 초기진공이 1.5×10^{-4} Pa 이하로 유지하였다. 증착되는 박막의 균일도를 유지하기 위하여 기판 상부에 rotator를 사용하여 기판회전의 회전시켰다. 스퍼터 기체로는 고순도 Ar (99.99%)과 고순도 O_2 (99.99%)를 사용하였다. 유량조절계(Mass flow controller, MFC)와 게이트 밸브 및 스로틀 밸브를 통하여 각각의 가스유량과 진공 배기속도 사이의 압력을 일정하게 유지 시켰다. 초기 진공도와 증착공정 진공도는 저진공에서는 convectron gauge를 사용하고 고진공에서는 ionization gauge를 각각 사용하여 측정하였다. 그림 1은 RF/DC Magnetron Sputter 장치 모식도이다.

그림 1 RF/DC Magnetron Sputter 장치 모식도
Fig. 1 Schematics of RF/DC Magnetron Sputter

ITO/Au/ITO 다층 박막인 경우 하부 ITO 박막의 두께는 50 nm로 유지한 후 층간 금속막으로 이용된 Au층의 두께를 10 nm를 기준으로 하여 5~20 nm로 증착률에 따라 변

화시켜 증착하였고 각각 상부 ITO 박막의 두께를 다르게 하여 다층 박막의 총 두께는 100 nm로 일정하게 유지시켰다. AZO/Au/AZO 다층 박막인 경우 하부 AZO 박막의 두께는 50 nm로 유지한 후 층간 금속막으로 이용된 Au층의 두께를 10 nm를 기준으로 하여 50 nm 증착률에 따라 변화시켜 증착하였다. 증착 중의 기판 온도는 K-type의 접촉식 열전대 (ht-20, Korea)를 이용하여 $< 70^\circ\text{C}$ 를 유지하였다. 표 1과 표 2는 ITO, AZO 박막 및 Au 박막의 증착 조건과 다층 박막의 크기이다.

표 1 ITO, AZO 및 Au 박막의 증착 조건

Table 1 Deposition Conditions of ITO, AZO and Au Thin Films

	ITO	AZO	Au
Base pressure [$\times 10^{-4}$ Pa]	1.5	1.5	1.5
Deposition pressure [$\times 10^{-2}$ Pa]	1.0	1.0	2.0
Power density [W/cm^2]	RF, 2.5	RF, 3.0	DC, 2.3
Deposition rate [nm/min]	14	14	20
Gas flow rate [Ar/O_2 sccm]	5/0.03	10	5
Substrate temperature [$^\circ\text{C}$]	≤ 70	≤ 70	≤ 70

표 2 ITO, AZO, Au 다층 박막의 크기

Table 2 Dimension of ITO, AZO and Au thin films

Type	ITO/Au/ITO/PET
T-1	45 nm ITO / 5nm Au / 50 nm ITO
T-2	40 nm ITO / 10nm Au / 50 nm ITO
T-3	30 nm ITO / 20nm Au / 50 nm ITO
Type	AZO/Au/AZO/PET
A-1	50 nm AZO / 10nm Au / 50 nm AZO

결정화 분석 방법은 X-선 분석기(Rigaku, Japan)를 이용하였다. 시편의 크기는 1X1 cm^2 이며 X-선은 Cu-K α 선 ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$), 가속전압=35 kV, 전류=20 mA, 20 ~ 80°의 범위에서 측정하였다. 표면조도는 원자력현미경 (Atomic force microscope, Parks Instrument, USA)을 이용하였다. 시편은 2X2 cm^2 크기로 준비하고 2X2 μm 영역을 측정하였다. 전기적 특성 분석은 Hall effect 분석장치 (Digital Instruments, USA)를 이용하여 인가전류=0.1 mA, 인가자장=1000 gauss를 사용하였다. 광학적 흡수율과 투과율 측정은 UV-VIS Spectrometer (Varian, USA)를 사용하여 PET 기판이 포함된 ITO 단층 박막과 층간 금속막 Au층의 두께 변화에 따라 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 2는 X선 회절도이다. 그림 3-1-1에서와 같이 ITO 단일 박막은 비정질이며, Au가 첨가된 복합박막은 결정질이었다. 이는 앞선 결과와 일치한다.[11-12] 여기서 Au층의 두께가 5nm 두께는 결정화가 관찰되지 않으나, 10nm 부터 In_2O_3 (400) 회절선이 관찰되었다. 이는 In_2O_3 가 결정화 진행되고 있음을 의미한다. Au층의 두께가 5nm에서 Au(111) 회절선의 강도가 뚜렷하지 않으며 일부 회절각의 풀림(peak broadening) 현상이 관찰되었으며 Au층의 두께가

10nm인 시료에서는 Au(111)의 회절선이 관찰되었다. 이는 In_2O_3 의 결정화 정도가 기지 금속인 Au의 결정화와 관계 있음을 보여준다. 결정성장 정도를 분석하기 위하여 원자력 현미경(AFM)을 이용하여 박막의 표면 형상을 측정하였다. 그림 3은 ITO 단층과 ITO/Au/ITO, AZO/Au/AZO 복합층의 3차원 표면형상이다. 그림 3에서와 같이 상부 ITO는 기지에 대하여 수직방향으로 주상정(columnar grain)이 성장한 것을 보여주고 있다. 이와 같은 박막의 주상정의 형상은 원자 크기의 표면 거칠기와 관련 있다.

그림 2 ITO 단층 박막과 ITO/Au/ITO 다층 박막의 XRD 회절도

- (a) ITO 단층 박막
(b) ITO(45 nm)/Au(5 nm)/ITO(50 nm)/PET
(c) ITO(40 nm)/Au(10 nm)/ITO(50 nm)/PET,
(d) ITO(30 nm)/Au(20 nm)/ITO(50 nm)/PET

Fig. 2 X-ray Spectra of Thin ITO Single Layer and ITO, AZO, Au Multi-layers :

- sample-1 ITO(45 nm)/Au(5 nm)/ITO(50 nm)/PET
sample-2 ITO(40 nm)/Au(10 nm)/ITO(50 nm)/PET
sample-3 ITO(30 nm)/Au(20 nm)/ITO(50 nm)/PET

표 3은 표면 거칠기 값이다. 표 3에서와 같이 ITO 복합 박막이 단일 ITO 박막보다 거칠기가 작다. 이는 ITO 복합 박막의 주상정의 크기가 상대적으로 작고 고르게 성장한 것을 의미한다. 이와 같은 현상은 상경계면(interface)에서의 핵생성과 성장 거동은 계면에서의 격자면 간거리의 차이 (lattice mismatch)에 의한 변형 응력이 지배한다는 고전적 핵생성과 성장기구(nucleation and growth mechanism)로 설명이 가능하다.[13-15]

그림 2의 X-선 분석으로부터 ITO(45nm)/Au(5nm)/ITO(50nm)의 박막의 경우 Au(5nm)의 기지가 비정질이다. ITO(45nm)는 비정질 Au위에서 핵생성과 성장이 진행되므로 비정질 Au는 ITO의 상 경계면에서의 ITO 결정 배향성(crystal orientation)에 영향을 주지 못하므로 무질서하게 성장한 주상정의 ITO의 표면 거칠기가 크다. Au두께가 10nm이상이면 그림 2의 X선 회절 분석 결과와 같이 Au의 결정화가 일부 진행되어 있다. 일부 결정화된 Au와 상경계에서의 ITO의 핵생성과 성장은 Au의 결정화에 영향을 받게 된다. 격자면의 차이에서 유발되는 변형량을 최소화하기 위하여 Au

표 3 ITO 단층 박막 및 ITO, AZO, Au 다층박막의 AFM 표면 거칠기(Ra)

Table 3 Surface Roughness of Thin ITO Single Layer and ITO, AZO, Au Multi-layers (Ra)

sample	ave. roughness [nm]
ITO	1.7
Au(5nm)/ITO	0.7
Au(10nm)/ITO	0.5
Au(20nm)/ITO	1.5
AZO/Au(10nm)/AZO	1.8

의 면간 거리와 ITO의 면간 거리가 가능한 유사한 면이 상경계면으로 하여 성장한다. 여기서 Au가 일부 결정화가 진행되었기 때문에 ITO는 특정한 방향으로의 배향(crystal orientation)을 유도하여 비교적 균일한 방향으로 성장하여 ITO(40nm)/Au(10nm)/ITO의 경우 표면 거칠기가 낮아진다. 한편 Au 두께가 20nm로 증가하면 그림 2의 X선 회절선도에서와 같이 Au(111) 회절선의 강도가 급격히 증가하는데 이는 Au가 완전히 결정화가 진행된 것을 의미한다. 결정화된 Au의 (111)면의 면간 거리 $a_{\text{Au}(111)}$ 와 $\text{In}_2\text{O}_3(400)$ 면의 면간 거리 $a_{\text{In}_2\text{O}_3(400)}$ 의 크기가 비교적 유사지만 차이가 있기 때문에

그림 3 ITO단층 박막 및 ITO, AZO, Au다층 박막의 표면 형상

- (a) ITO 단층 박막
(b) T-1 : ITO(45 nm)/Au(5 nm)/ITO(50 nm)/PET
(c) T-2 : ITO(40 nm)/Au(10 nm)/ITO(50 nm)/PET
(d) T-3: ITO(30 nm)/Au(20 nm)/ITO(50 nm)/PET
(e) A-1: AZO(50 nm)/Au(10 nm)/AZO(50 nm)/PET

Fig. 3 Topography of Thin ITO Single Layer and ITO, AZO, Au Multi-layers

- (a) ITO single layer
(b) Type 1: ITO(45 nm)/Au(5 nm)/ITO(50 nm)/PET
(c) Type 2: ITO(40 nm)/Au(10 nm)/ITO(50 nm)/PET
(d) Type 3: ITO(30 nm)/Au(20 nm)/ITO(50 nm)/PET
(e) Type 4: AZO(50 nm)/Au(10 nm)/AZO(50 nm)/PET

ITO가 성장하면서 Au와 ITO의 상 경계면에서 변형응력장(strain field)이 점차 증가하게 된다. 이는 상경계면 부근에서의 ITO가 불규칙 배향(lattice mis-orientation)을 갖게 하고 주상정(columnar grain)의 비정상 성장(abnormal growth)을 유발시키기 때문에 ITO의 두께가 약 30nm로 작지만 표면 거칠기가 증가한 것으로 관찰되었다.

그림 4는 ITO/Au/ITO 다층 박막에서 Au층의 두께 변화에 따른 200~800 nm 파장영역에서의 광 투과율이다. PET와 ITO 단층의 가시광선 투과율(550nm 기준)은 각각 90%와 74%이었다. Au층이 5nm이면 가시광선 투과율(550nm 기준)이 77%로 증가하고 10nm와 20nm로 두께가 증가하면 감소한다. 5nm 두께의 Au층은 그림 2의 X선 회절 분석 결과로부터 비정질이므로 빛을 효과적으로 반사와 굴절시켜서 광투과율이 증가하였다. 그러나 Au의 두께가 10nm이상되면 Au의 결정화가 진행되고 두께 증가로 인한 빛의 투과가 상대적으로 어려워져서 투과율이 감소하였다.

그림 4 PET 기판 위에 증착되어진 ITO 단층 박막과 ITO/Au/ITO 다층 박막의 가시광 투과율.

T-1 : ITO(45 nm)/Au(5 nm)/ITO(50 nm)/PET
T-2 : ITO(40 nm)/Au(10 nm)/ITO(50 nm)/PET
T-3 : ITO(30 nm)/Au(20 nm)/ITO(50 nm)/PET

Fig. 4 Transmittance of ITO/Au/ITO Multi-layers on PET
Type 1 : ITO(45 nm)/Au(5 nm)/ITO(50 nm)/PET
Type 2 : ITO(40 nm)/Au(10 nm)/ITO(50 nm)/PET
Type 3 : ITO(30 nm)/Au(20 nm)/ITO(50 nm)/PET

그림 5는 일반적으로 사용되는 ITO 투명전도막((120°C annealed)/PET 필름과 저온 증착한 AZO/Au/AZO /PET 필름의 광 투과도이다. 그림 3-3-2에서와 같이 AZO 다층박막이 ITO 단층박막 보다 우수함을 알 수 있다. 이는 AZO 복합박막이 ITO 단층박막을 대체할 수 있음을 보여준다.

표 4는 ITO 단층 박막과 ITO, AZO 복합 박막들의 전기적 특성이다. 표 4에서와 같이 ITO 단층 박막의 전자밀도, 이동도, 비저항, 면저항은 $2.3 \times 10^{19}/\text{cm}^3$, $85 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $31 \times 10^{-4} \Omega \text{ cm}$, $310 \Omega/\text{cm}^2$ 이었다.

그림 5 PET 기판 위에 증착 되어진 ITO 단층 박막과 AZO/Au/AZO 다층 박막의 가시광 투과율.

T-4 : ITO(100 nm)-120°C annealed/PET
A-1 : AZO(50 nm)/Au(10 nm)/AZO(50 nm)/PET

Fig. 5 Transmittance of AZO/Au/AZO Multi-layers on PET
Type 4 ITO(100 nm)-120°C annealed/PET
Type 5 AZO(50 nm)/Au(10 nm)/AZO(50 nm)/PET

표 4 ITO 단층 박막과 ITO, AZO 다층 박막의 전기적 특성
Table 4 Electrical Properties of Thin ITO Single Layer and ITO, AZO, Au Multi-layers

	ITO	T-1	T-2	T-3	T-4	A-1
Carrier density [$10^{19}/\text{cm}^3$]	2.3	61	220	420	3.6	360
Mobility [cm^2/Vs]	85	47	47	43	85	47
Resistivity [$10^{-4} \Omega \text{ cm}$]	31	2.1	0.56	0.17	25	0.34
Sheet resistance [Ω/cm^2]	310	21	5.6	1.7	120	8.6

T-1: ITO(45 nm)/Au(5 nm)/ITO(50 nm)/PET
T-2: ITO(40 nm)/Au(10 nm)/ITO(50 nm)/PET
T-3: ITO(30 nm)/Au(20 nm)/ITO(50 nm)/PET
T-4: ITO(45 nm)-120°C annealing/PET
A-1: AZO(50 nm)/Au(10 nm)/AZO(50 nm)/PET

저온 공정으로 제조된 ITO/Au/ITO 복합박막의 전자밀도, 이동도, 비저항, 면저항은 Au의 두께가 5, 10, 20 nm일 때 각각 $3.6 \times 10^{19} \sim 4.2 \times 10^{21}/\text{cm}^3$, $43 \sim 85 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $0.17 \times 10^{-4} \sim 25 \times 10^{-4} \Omega \text{ cm}$, $1.7 \sim 20 \Omega/\text{cm}^2$ 범위였다. Au의 두께 전하밀도, 이동도, 비저항이 Au의 두께에 비례하여 증가하였다. 전기전도도(σ)는 전하밀도(n), 전하량(q), 이동도(μ)로부터 $\sigma = nq\mu$ 로 표시되므로 전자밀도와 이동도가 높아지면 전기전도도가 높아져서 면저항이 낮아진다. 따라서 Au의 두께가 증가하면 Au의 우수한 전기전도성으로 복합박막의 전기전도도가 증가하므로 면저항이 낮아졌다. 특히 동일한 10 nm 두께의 Au를 갖는 AZO와 ITO 복합 박막의 경우에 전기적 특성이 유사하였다. 이는 복합 박막으로의 전기적 특성이 Au에 주로 의존함을 보여준다.

4. 결 론

투명 전도막의 전기적 특성을 향상시킬 목적으로 ITO/Au/ITO와 AZO/Au/AZO 박막을 저온(< 70℃)공정으로 수행하여 다음을 얻었다.

1. 저온(< 70℃)공정에서 제조된 단일 ITO는 비정질(amorphous)이고 ITO/Au/ITO 복합 박막의 ITO층은 결정(crytal)이었다. 복합박막의 ITO 결정화는 Au층의 결정화와 관계있다.
2. ITO 단층 박막의 전자밀도, 이동도, 비저항, 면저항은 각각 $2.3 \times 10^{19}/\text{cm}^3$, $85 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $31 \times 10^{-4} \Omega \text{ cm}$, $310 \text{ x} \Omega/\text{cm}^2$ 이었다. 저온 공정으로 제조된 ITO/Au/ITO 복합박막의 전자밀도, 이동도, 비저항, 면저항은 Au의 두께가 5, 10, 20 nm일 때 각각 $3.6 \times 10^{19} \sim 4.2 \times 10^{21}/\text{cm}^3$, $43 \sim 85 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $0.17 \times 10^{-4} \sim 25 \times 10^{-4} \Omega \text{ cm}$, $1.7 \sim 20 \text{ x} \Omega/\text{cm}^2$ 범위였다. 면저항은 Au두께에 의존하였다.
3. 저온 공정으로 제조된 AZO/Au/AZO의 면저항은 $8.6 \Omega/\text{cm}^2$ 이며 단일 ITO박막보다 우수하여 대체 가능하다고 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] T. A. Chen, A. K. Y. Jen, and Y. Cai, *Macromolecules*, vol. 29, 1996, p. 535.
- [2] Y. M. Lee, *Composites Processing Methods*, Owenscorning MEMO Report, 04-m-50 (2004)
- [3] K. Ichimira, and N. I. Oohara, *J. of Polym. Chem.* vol. 25, p. 3063 1987.
- [4] Y. Zhai, Q. Yang, R. Zhu, Y. Gu, *J. Master. Sci.*, vol. 43, p. 338 2008,
- [5] H. Gao, D. Wang, W. Jiang, Z. Jiang, *Rapid Comun.*, vol. 28, p. 252 2007.
- [6] K. L. Chopre, S. Major and D. K. Pandya, *Thin Solid Films*, vol. 102, p.1 1983
- [7] A. K. Kulkarni, K. H. Schulz, T. S. Lim and M. Khan, *Thin Solid Films*, vol. 345, p. 273 1999.
- [8] M. Fahland, P. Karlsson, C. Charton, *Thin Solid Films*, vol. 392, p. 334 2001.
- [9] 14. Y. Morinaga, K. Sakuragi, N. Fujimura, and T. Ito, *J. Cryst. Growth*, vol. 174, p. 691 1997.
- [10] H. Kostiln, R. Jost, W. Lens, *Phy. Stat. Sol(a)*, vol. 29, p. 87, 1975.
- [11] Y. Takashima, K. Sasaki, T. Hata and A. H. M. Zahirul Alam, *Thin Solid Films*, vol. 279, p. 131 1996.
- [12] M. Bender, W. Seeling, C. Daude, H. Frankenberger, B. Ocker and J. Stollenwerk, *Thin Solid Films*, vol. 326(1,2), p. 67 1998.
- [13] J. K. Lee, J. H. Choy and Y. Choi, *Surface Science*, vol. 256, p. 147 1991.
- [14] J. K. Lee and W. Tao, *Acta Met.*, vol. 42, p. 569 1995.
- [15] J. K. Lee, "An Instability Analysis of Heteroepitaxial

Interfaces via a Discrete Atom Method", in *Dynamics of Crystal surfaces and Interfaces*, ed. P.M. Duxbury and T. Pence, Plenum Press, New York, NY, pp. 125-134, 1997.

저 자 소 개

지 영 석

선문대 공대 금속재료공학과 석사과정

최 용

선문대 공대 전자재료공학과 교수

이 상 헌 (李尙憲)

1989년 일본 TOKAI Univ. 전자공학과 학사. 1991년 일본 TOKAI Univ. 전자공학과 석사. 1994년 일본 TOKAI Univ. 전자공학과 박사. 1994년 4월 ~ 1997년 2월 일본 초전도공학연구소 주임연구원. 1997년 3월 ~ 현재 선문대학교 전자공학과 교수