

SAW-ED 시스템을 이용한 유/무기 소재 증착에 관한 연구

김현범*, 김경환*, 시디쿠이 가야수딘*, 임종환*, 양형찬**, 최경현*,#

*제주대학교 메카트로닉스공학과

A Study on Organic/Inorganic Materials Deposition Using SAW-ED System

Hyun Bum Kim*, Kyung Hwan Kim*, Siddiqi Ghayas*, Jong Hwan Lim*, Hyoung Chan Yang**,
Kyung Hyun Choi*:#

*Department of Mechatronics Engineering, Jeju UNIV, **Korea Leading Energy Management
(Received 15 July 2016; received in revised form 31 August 2016; accepted 5 September 2016)

ABSTRACT

In various industries, many researches studies have been done in using nano thin film fabrication technology. In the field of printed electronics, various electronic devices can be fabricated using a direct printing process of on multiple functional materials. It has the advantages of low prices, environment-friendly environmentally friendly, flexibility, large scale, mass production produced, simple process and so on. In this study, a viable thin film fabrication technology has been introduced using the surface acoustic wave mechanism for thin film deposition. Fabrication of thin films using organic, inorganic and composite of organic/inorganic materials have been analyzed through the experimental research. In this experiment, organic material MEH:PPV, inorganic material ZnO and composite material MEH:PPV/ZnO have been deposited as thin films.

Key Words : Nano Thin Film(나노박막), Electrospray(정전분무), SurfaceAcousticWave(표면탄성파), Deposition(증착), Organic/Inorganic Material(유/무기소재)

1. 서 론

최근 상온·상압 기반의 친환경적이며 높은 균일도 및 해상도를 구현할 수 있는 인쇄전자 기술이 큰 이슈가 되고 있다. 여기서 인쇄전자 기술은 기능성

용액소재를 직접인쇄공정을 이용하여 다양한 전자소자를 제작하는 기술을 말하며 저가격, 친환경, 유연성, 대면적, 대량생산, 단순공정이라는 큰 특징을 갖고 있다.^[1,2]

본 연구는 인쇄전자 기술 중 잉크젯 프린팅에 내포되는 정전 스프레이 증착법(electrospray deposition : ESD)과 표면탄성파 분사 기술을 접목한 새로운 방식의 상향식 나노박막 증착 시스템인 SAW-ED(Surface Acoustic Wave based Electrospray deposition)시

Corresponding Author : amm@jejunu.ac.kr
Tel: +82-64-754-3713, Fax: +82-64-752-3174

시스템을 이용한 나노박막 증착에 관한 연구이다.

화학증착과 물리증착과 같은 종래의 대표적인 나노박막 증착 기술의 경우 주로 고온 또는 진공 환경에서 공정이 진행되어야 하기 때문에 최근 급속히 변화하는 다양한 특성의 기판제작 요구에 대응하기 어려울 뿐만 아니라 아직 친환경공정, 고속 증착, 원가 절감 등에는 한계를 보이고 있는 실정이다.

반면, SAW-ED 시스템을 이용한 나노박막 증착법은 정전기력 분무를 통하여 1차 미립화 및 하전 (electric charge)된 입자를 표면탄성과 발생장치 위로 공급하고, 공급된 액적을 표면탄성과를 이용하여 2차 미립화 시킨 후 정전기력 유도를 통하여 기판위로 증착시키는 공정 방법으로 기존 고온·고진공의 나노박막 증착 공정이 갖고 있는 기판 특성에 대한 제약이 없으며 다양한 전도성 용액 소재에 대응이 가능하고 상온·상압 공정 환경에서 고온·고진공의 스퍼터링 공정 성능을 만족시킬 수 있어 효율성이 뛰어나다.

본 논문에서는 SAW-ED 시스템의 성능을 실험적 연구를 통하여 검증해보고자 유기 용액소재인 MEH:PPV와 무기 용액소재인 ZnO, 그리고 유/무기 혼합액을 활용한 증착 공정 실험을 각각 수행한다. 또한 증착샘플에 대한 성능 분석을 통하여 유/무기 하이브리드 소자 제작의 가능성을 확인한다.

2. 나노박막 증착 시스템 원리

2.1 정전분무 기반의 스프레이 기술

정전분무 기술은 노즐과 기판 사이에 발생된 전기장에 의한 메니스커스(meniscus)로부터 액적을 미립화하고 대전된 미립자의 전위 방향성을 제어하여 기판상에 유도 증착하는 기술을 말한다.^[3]

용액이 공급되는 노즐과 기판사이에 고전압을 인가하면 노즐은 양(+)의 전극으로 작용하게 되는데 이때 용액 내부에 존재하는 양이온들은 양극화된 노즐과의 극성반발력에 의해 유동저항이 적은 노즐 토출구 방향으로 이동하게 되고, 노즐 토출구에 용액이

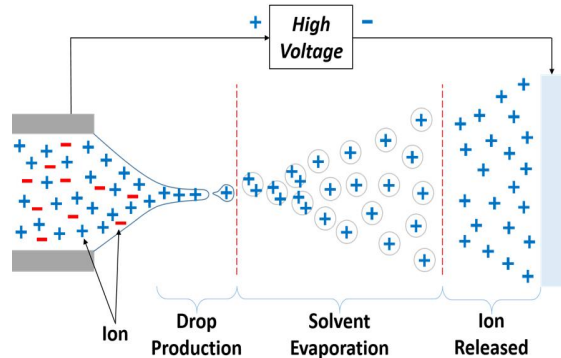


Fig. 1 Process technology overview of electro-spray deposition

뻗히면서 메니스커스를 형성하게 된다. 노즐 토출구에 형성된 메니스커스는 일정한 인가전압 값에 의해 첨예한 원추형으로 변모하여 용액을 토출하게 되고 분무된 용액 표면의 에너지의 불안정성과 토출되는 동안 반발력에 의해 연속적인 분열이 발생하게 된다.^[4,5]

Fig. 1에는 정전분무의 원리에 의해 용액이 미립화되고 기판상에 증착되는 정전분무 공정의 개요도를 나타내었다. 노즐 토출구에 형성된 메니스커스는 인가전압과 주입되는 압력에 의하여 분무되며 미립화를 이루어 정전기력 유도에 의해 기판상에 증착된다. 이 과정에서 미립화된 입자의 솔벤트(solvent)는 기판상으로 유도되는 구간에서 증발하게 되며 미립자의 크기가 작을수록 대기 중 노출이 증대되어 아주 미세한 초미립자 상태로 기판에 증착시킬 수 있다.^[5,6]

Fig. 2 에서는 메니스커스 형성을 위한 힘의 변위와 모델을 나타내는데, 토출구에 뻗힌 액체는 메니스커스가 갖는 표면에너지가 전기적 외력에 의한 에너지보다 작을 경우 토출이 일어난다.^[7]

식(1)은 토출구에 형성되는 전기장 E_c 의 세기를 나타내는데, 여기서 V_c 는 토출구의 포텐셜(potential)을 나타내며 r_c 와 d 는 각각 토출구의 직경, 토출구 끝단에서부터 기판사이의 거리 즉 전극 간격을 의미한다.^[7,8]

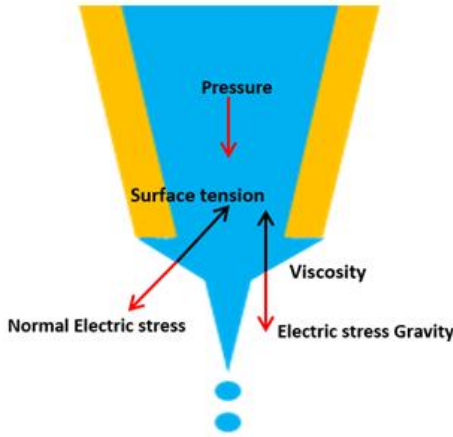


Fig. 2 Models of force and displacement for meniscus formation

$$E_c = \frac{2V_c}{r_c \ln(4d/r_c)} \quad (1)$$

또한 Ganan-Calvo의 Scaling 법칙을 통하여 입자의 크기 d_0 를 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$d_0 = 3.78\pi^{-2/3} Q^{1/2} \left(\frac{\rho \epsilon_0}{\gamma K} \right)^{1/6} \quad (2)$$

여기서 Q 는 용액 공급유량, ρ 는 용액의 밀도, ϵ_0 는 자유공간상의 유전율, γ 는 표면장력, K 는 용액의 전도율을 나타낸다. 용액의 물성치를 배재할 경우 액적의 크기를 좌우하는 변수는 공급유량 Q 이며 이를 통해 용액의 미립화 정도를 제어할 수 있다.^[9-12]

2.2 표면탄성과 분사 기술

표면탄성파(Surface Acoustic Wave : SAW)는 탄성체 기관 표면에 에너지가 집중된 형태로 전달되는 파를 의미하는데, Fig. 3 과 같이 압전재료 위에 빗살무늬 금속전극(finger pattern)이 증착된 전극변환장치(interdigital transducer)에 교류 전압을 인가

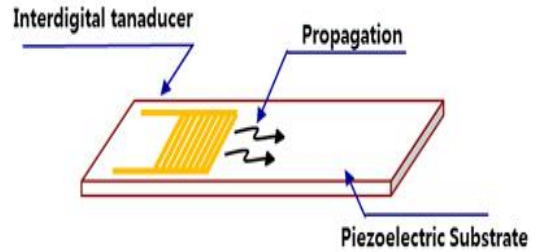


Fig. 3 Surface acoustic wave generator

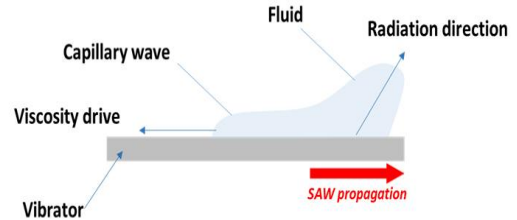


Fig. 4 Distribution of the forces that act on IDT substrate

을 때 발생된다. 전극변환장치는 전기적 에너지를 기계적 진동 에너지로 변환시켜 주는 일종의 변환기로서 그 진동 에너지를 이용하여 용액을 미립화시켜 분사시킨다.^[13]

또한 전극변환장치 위에 위치하는 액체는 Fig.4와 같은 모양을 갖는데 이는 고체-액체의 경계에서는 표면장력이 존재하고 표면탄성파의 진행 방향으로 액체가 이동하는 힘이 존재하기 때문이다. 이때 용액의 얇은 부분에서는 Capillary Wave가 존재하고, 그로인해 미세액적이 공기중으로 분사된다. 이와 같이 기관위의 액적이 표면탄성파를 만날 경우 표면탄성파는 기체와 액체의 경계면을 뚫고 액체 내부로 진행되며 이 과정에서 생긴 에너지 유출의 결과로 액체 속에서는 증파가 발생하게 된다.

표면탄성파 유출형성의 파장과 증파의 파장은 각각 Fig. 5에서 λ_L 과 $\lambda_{\omega L}$ 으로 표기하였다. 이 값으로 Rayleigh Angle을 $\theta_L = \sin^{-1}(\lambda_{\omega L}/\lambda_L)$ 을 계산할 수 있다.^[13,14]

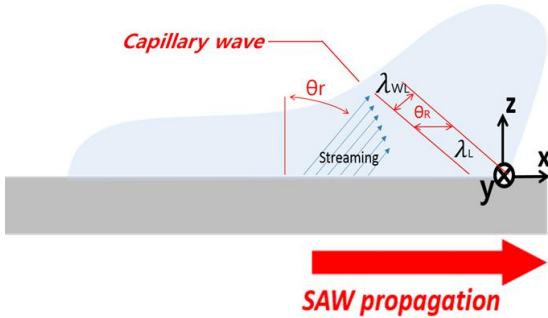


Fig. 5 Distribution of the forces acting on the solution

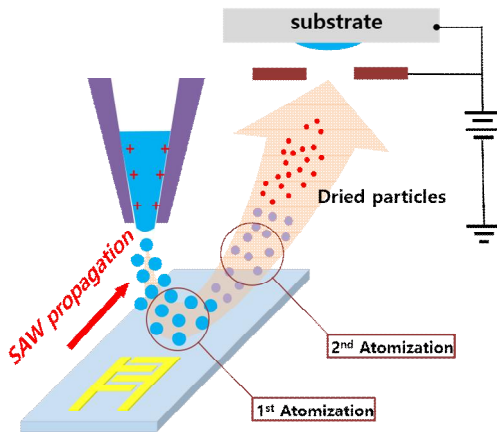


Fig. 6 Process diagram of hybrid nano-thin film deposition system

3. 나노박막 증착 실험

3.1 나노박막 증착 시스템

표면탄성파를 이용한 나노박막 증착법은 압전 효과의 결과로 발생된 표면탄성파를 이용하여 액적을 미립화 시켜 분무하는 기술이다. 그러나 표면탄성파에 의해 분사되는 힘만으로는 원하는 위치에 나노박막이 증착되지 않는다. 따라서 효과적인 나노박막

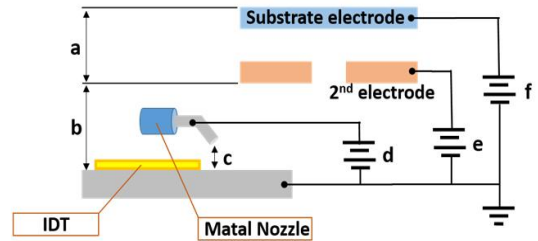


Fig. 7 Experiment overview of hybrid nano-thin film deposition system

증착 공정을 위하여 정전기력에 의한 증착 방법을 결합한 나노박막 증착 시스템인 SAW-ED 시스템을 구성하였다.

SAW-ED 나노박막 증착 공정의 개요도는 Fig. 6 과 같다. 공급되는 용액은 노즐에서 1차 미립화와 하전이 이루어져 전극변환장치로 공급되며 전극변환장치 위로 공급된 1차 미립화 액적들은 표면탄성파에 의한 2차 미립화가 진행되어 초미립자 상태로 기관위로 증착된다.

3.2 유/무기 용액 소재 나노박막 증착

시스템의 성능을 확인해 보고자 유기용액소재인 MEH:PPV와 무기용액소재인 ZnO를 사용하여 나노박막 증착 실험을 진행하였다. SAW-ED 나노박막 증착 실험의 개요도는 Fig. 7과 같다. 여기서 a , b , c 는 각각 전극간의 거리를 의미하며 V_d , V_e , V_f 는 인가전압 값을 의미한다. 실험에는 전극간 거리값인 a , b , c 의 값은 고정변수로 두었고, 노즐 공급 전압인 V_d 를 제외한 전압조건 또한 모든 공정에서 동일하게 진행되었다. 노즐공급전압인 V_d 의 경우 공급되는 용액에 따라 각각 다른 인가전압에서 공정을 진행하였다. 표면탄성파 발생장치의 인가 주파수는 12.3MHz이며 표면탄성파를 이용한 미립화 공정에서는 10W이상의 출력을 필요로 하므로 실험에는 14W의 출력으로 진행하였다. 또한 모든 실험에서 증착

반복 횟수를 5회로 진행하였으며 이는 나노박막을 형성시키기 위해서는 반복적인 증착이 필요하기 때문이다.

3.2.1 MEH:PPV 나노박막 증착 실험

유기용액 소재인 MEH:PPV의 경우 노즐직경 310 μm , 공급유량 800 $\mu\text{l}/\text{h}$, 노즐인가전압 -5.07kV의 조건에서 나노박막 증착 공정을 진행하였으며 반복증착 횟수 5회, 스테이지 이동 속도는 10mm/s로 설정하였다. 세부적인 공정 조건은 Table.1에 나타내었다.

Fig. 8의 (a)와 (b)는 각각 MEH:PPV 용액이 증착된 샘플의 표면과 단면의 SEM 사진으로서 두께 측정의 경우 샘플 임의의 5개 지점에서 진행하였다. Fig. 8(a)로부터 박막형성이 이루어졌음을 알 수 있으며, Fig. 8(b)로부터 두께측정 결과 평균 263nm의 박막이 형성되었음을 확인 할 수 있다. Fig. 9(a)는 FT-IR을 이용한 박막코팅 샘플의 표면 성분 측정 데이터를 나타내며 Fig. 9(b)에는 나노박막 증착 샘플의 투과율의 결과를 나타내었다. MEH:PPV 나노박막의 투과율은 측정파장 300nm~800nm에서 측정이 진행되었으며 80%의 광투과율을 확인하였다.

Table 1 Experiment parameters of MEH:PPV ink

No	Parameters	Values
01	Nozzle diameter	310 μm
02	Flow rate	800 $\mu\text{l}/\text{h}$
03	mask diameter	10mm
04	(a) Mask to substrate distance	05mm
05	(b) IDT to Mask distance	30mm
06	(c) Nozzle to IDT distance	10mm
07	(d) Nozzle(-ve)-appl. voltage	-5.07kV
08	(e) Mask(+ve)-appl. voltage	2.312kV
09	(f)Substrate(+ve)-appl. voltage	4.27kV
10	Applied frequency	12.3MHz
11	Pf/ Pr	14W : 1W
12	Passing/Speed	5times-10m m/sec

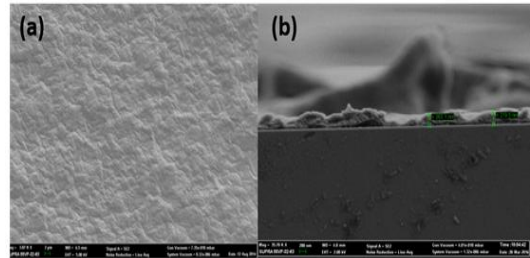


Fig. 8 FE-SEM images for MEH:PPV thin films
(a) MEH:PPV surface image, (b) MEH:PPV cross sectional image

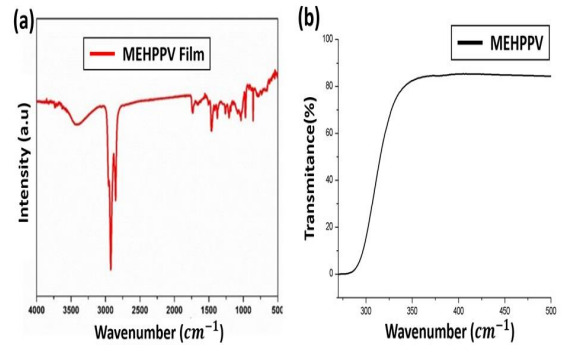


Fig. 9 FT-IR and UV spectroscopy of MEH:PPV thin film

3.2.2 ZnO 나노박막 증착 실험

무기용액 소재인 ZnO의 나노박막 증착실험에 대한 공정 조건은 Table. 2 에 나타내었으며 앞선 실험에서의 공정조건에서 노즐인가전압과 공급유량이 증가되었다. 반복증착 횟수 및 속도 또한 5회, 10mm/s로 이전 실험과 동일하게 진행하였다. Fig. 10의 (a)와(b)에 나타난 실험 결과로부터 ZnO 증착 샘플의 나노박막이 형성된 표면 상태와 평균 380nm의 두께를 확인 할 수 있었다. 또한 Fig. 11(a)의 FT-IR측정 결과로 증착샘플의 성분이 ZnO임을 확인 할 수 있었다. ZnO 나노박막 샘플의 광투과율은 Fig. 11(b)와 같이 80% 미만으로 확인되었다.

Table 2 Experiment parameters of ZnO ink

No	Parameters	Values
01	Nozzle diameter	310 μm
02	Flow rate	900 $\mu\text{l}/\text{h}$
03	mask diameter	10mm
04	(a) Mask to substrate distance	05mm
05	(b) IDT to Mask distance	30mm
06	(c) Nozzle to IDT distance	10mm
07	(d) Nozzle(-ve)-appl. voltage	-5.85kV
08	(e) Mask(+ve)-appl. voltage	2.312kV
09	(f) Substrate(+ve)-appl. voltage	4.27kV
10	Applied frequency	12.3MHz
11	Pf / Pr	14W : 1W
12	Passing/Speed	5times-10m m/sec

Table 3 Experiment parameters of MEH:PPV/ZnO Hybrid ink

No	Parameters	Values
01	Nozzle diameter	310 μm
02	Flow rate	1200 $\mu\text{l}/\text{h}$
03	mask diameter	10mm
04	(a) Mask to substrate distance	05mm
05	(b) IDT to Mask distance	30mm
06	(c) Nozzle to IDT distance	10mm
07	(d) Nozzle(-ve)-appl. voltage	-6.42kV
08	(e) Mask(+ve)-appl. voltage	2.312kV
09	(f) Substrate(+ve)-appl. voltage	4.27kV
10	Applied frequency	12.3MHz
11	Pf / Pr	14W : 1W
12	Passing/Speed	5times-10m m/sec

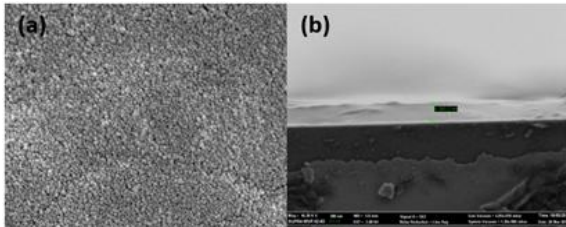


Fig. 10 FE-SEM images for ZnO thin films
(a) ZnO surface image, (b) ZnO cross sectional image

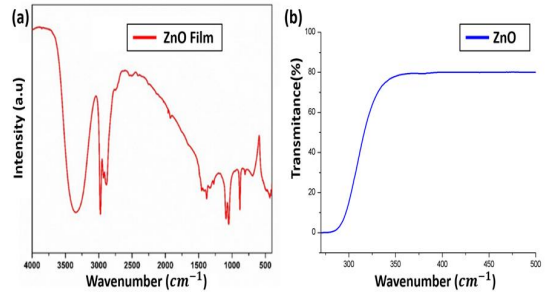
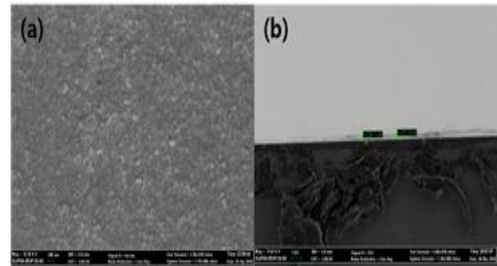


Fig. 11 FT-IR and UV spectroscopy of ZnO thin film



(a) surface image (b) cross sectional image

Fig. 12 FE-SEM images for MEH:PPV/ZnO Hybrid thin films

3.2.3 MEH:PPV/ZnO 나노박막 증착 실험

SAW-ED 나노박막 증착시스템을 이용하여 유기 용액소재와 무기용액소재의 혼합물의 증착실험을 진행하였다. 이는 전자소자에서의 유기물층과 무기물층의 다층박막(layer-by-layer)을 유/무기 혼합 단일 박막으로 대체하여 활용이 가능하다.

실험에 사용된 유/무기 혼합액은 MEH:PPV와 ZnO 용액을 1:1 비율로 혼합하였으며 SAW-ED시스템의 공정조건은 Table. 3과 같으며 증착반복 횟수와 증착속도는 앞선 실험조건과 동일하게 진행하였다.

Fig. 12(a)는 혼합잉크의 나노박막 증착 샘플의 표면 상태 이미지이며 균일하게 증착된 모습을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 12(b)에 보여지는 것과 같이 샘플의 측면 측정을 통하여 혼합용액의 나노박막 평균 두께 213nm를 확인할 수 있다. 또한 Fig. 13의

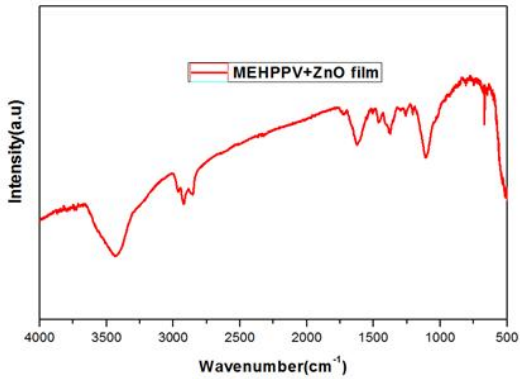


Fig. 13 FT-IR spectroscopy of MEH:PPV/ZnO thin film

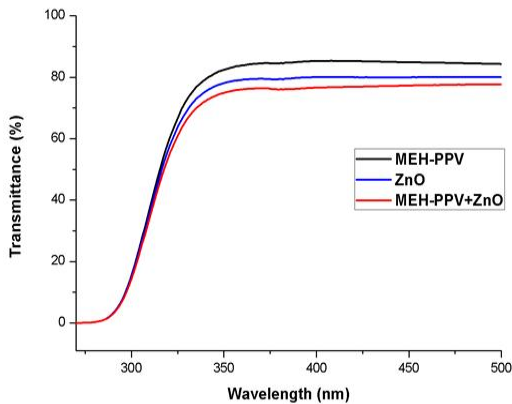


Fig. 14 UV spectroscopy of MEH:PPV/ZnO thin film

FT-IR 측정 이미지를 통하여 표면성분이 MEH:PPV와 ZnO 가 포함되는 박막임을 확인 할 수 있었다.

3.2.4 결과 분석

상압·상온 공정조건에서의 SAW-ED 시스템을 이용한 나노박막 증착 실험의 결과로부터 유/무기 하이브리드 소자 제작의 가능성을 알아보고자 나노박막 샘플의 투과도 및 전기적 특성 분석을 진행하였다. 나노박막 증착 샘플의 FE-SEM 측정 결과 유/무기 용액소재 모두 균일한 나노급의 박막을 형성하고 있음을 확인 할 수 있었다. UV/Vis Spectrophotometer(Model: La bda25)을 이용하여 광투과율을 측

정한 결과 세 가지의 용액소재의 광투과율은 70% 이상의 높은 투과율을 보여주었으며 Fig. 14 에 비교분석이 용이하도록 MEH:PPV와 ZnO, MEH:PPV/ZnO 합성 용액의 투과율을 함께 표기하였다. 또한 CV-IV System을 이용하여 나노박막 샘플의 전기적 특성을 측정된 결과를 Fig. 15와 같이 I-V 그래프로 표현하였다. 이를 활용하여 각각의 샘플의 저항을 계산해보면 MEH:PPV의 경우 $1.22\text{ k}\Omega$, ZnO의 경우 $2.51\text{ k}\Omega$, MEH:PPV/ZnO는 $2.57\text{ k}\Omega$ 의 값을 얻을 수 있다. 이를 Van der pauw 법칙을 이용하여 면저항을 구해보면 각각 $5.53\text{ k}\Omega/\square$, $11.38\text{ k}\Omega/\square$, $11.15\text{ k}\Omega/\square$ 가 되어, 각 샘플의 두께를 곱하여 Resistivity를 구하면 MEH:PPV $0.145\text{ m}\Omega\cdot\text{cm}$, ZnO $0.432\text{ m}\Omega\cdot\text{cm}$, MEH:PPV/Zn O $0.237\text{ m}\Omega\cdot\text{cm}$ 가 된다. 이에 따라 전도도를 구해보면 6.896 S/cm , 2.315 S/cm , 4.212 S/cm 의 수치를 구할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 상온·상압 공정조건에서 SAW-ED 시스템을 이용한 유/무기 소재의 나노박막 증착 실험을 진행하였으며, 나노박막 샘플의 측정 데이터를 토대로 SAW-ED 시스템의 성능을 검증하였다. 또한 나노박막 샘플의 특성을 분석하여 SAW-ED 시스템을 이용한 나노박막 형성 기술이 향후 유/무기 나노박막 증착 공정으로서의 활용 가능성을 검토하였다.

시스템의 성능을 확인하고자 유기용액소재인 MEH:PPV 용액의 증착실험과 무기 용액소재인 ZnO 용액의 증착실험을 진행하였으며 시스템의 활용도를 높이기 위하여 MEH:PPV/ZnO 혼합액의 증착 공정을 진행하였다. 3가지의 용액 소재의 나노박막 샘플은 증착 반복횟수 5회, 반복속도를 10 mm/s 로 동일하게 진행하였고 그 결과 각각 263 nm , 380 nm , 213 nm 의 결과를 얻어 상온·상압 공정 조건에서 높은 효율을 갖는 두께의 나노박막이 형성되었음을 확인 할 수 있다. 나노박막 샘플의 투과율 또한 80% 전, 후의 높은 투과율을 보이고 있고 전기적 특성 측정 결과를 통하여 소자제작에 필요한 전기적 특성을 갖고 있음을 확인 할 수 있었다.

SAW-ED 나노박막 증착 시스템을 이용하여 유/무기 용액소재의 상온·상압 공정조건에서 단일층 나

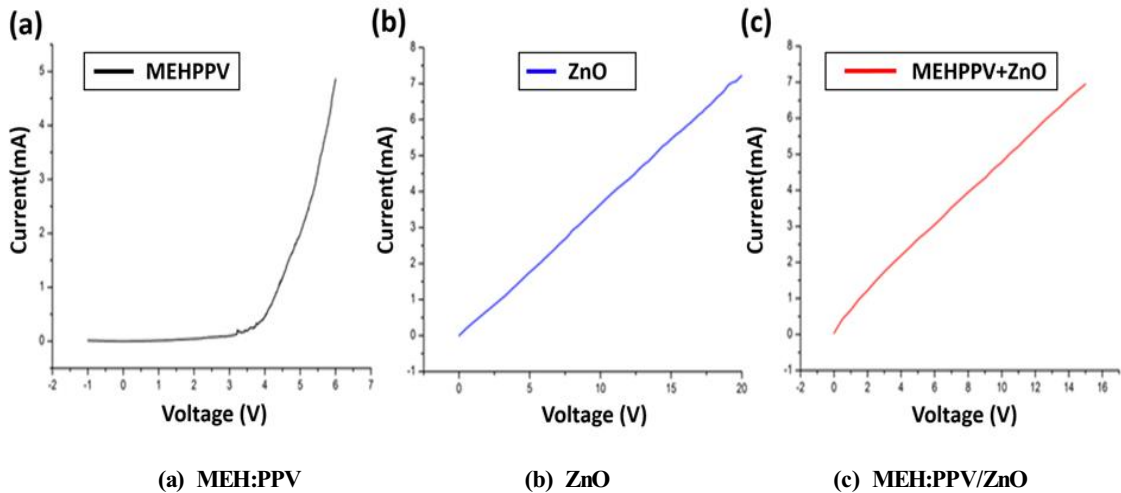


Fig. 15 I-V curves of nano-thin film

노박막을 형성시킬 수 있으며 유/무기 혼합액의 박막형성 또한 가능하며 다층구조로 활용되는 활성층을 단일층 구조로 증착하여 효율성이 높은 디바이스 제작에도 활용될 수 있음을 확인하였다.

그러나 SAW-ED기술은 연구단계의 기술로써 높은 안정성과 재현성의 확보를 위한 추가 연구가 진행되어야 하며 다양한 재료의 적용을 통하여 토출 특성분석이 이루어져야 할 것이다.

후 기

“이 논문은 2016년도 대한민국 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. NRF-2014R1A2A1A01007699)과 2016년 교육부와 한국연구재단의 지역혁신창의 인력양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2015H1C1A1035892).”

REFERENCES

1. Nano2020 Trends report, “Nano-Coating Technology, Developments and Prospect of Nano-Coating Technology” 2014
2. Jaemin Jung, “Trend and Prospect of thin Film Processing Technology”, Journal of the Korean Magnetics Society, Vol.21, NO.5, pp.185-192, 2011

3. Taylor, G.I. "Disintegration of Water Drop in an Electric Field", Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Volume.280, Issue.1382, pp.383-397. 1964.
4. Patrick K. Notz and Osman A. Basaran, “Dynamics of Drop Formation in an Electric Field”, Journal of Colloid and Interface Sciences, 213, pp. 218-237, 1999
5. Kyung-Hyun Choi, Nauman Malik Muhammad, Hyun-Woo Dang, Ayoung Lee, Jin-Soo Hwang, Jong-Won Nam, Beyoung-Hwan Ryu, “Electro spray Deposition of Thin Copper-indium-diselenide Films”, IJMR, Vol. 102, No.10, pp.1252-1260, 2011
6. Hyun-Woo Dang, Hyung-Chan Kim, Jeong-Beom Ko, Young-Jin Yang, Bong-Su Yang, Kyung-Hyun Choi, Yang-Hoi Doh, “A Study of Micro Stencil Printing based on Solution Atomization Process”, Korea Society for Precision Engineering, Vol.31, No.6, pp483-489, 2014
7. Joffe, C., Prunet-Foch, B., Berthomme, S., and Cloupeau, M., “Deformation of Liquid Meniscus Under the Action of an Electric Field”, Journal of Electrostatics, Volume.13, Issue151, 1982

8. Yuji ISHIDA, Keigo SOGABE, Shintaro KAI, and Tanemasa ASANO, "Droplet Ejection Behavior in Electrostatic Inkjet Driving", Japanese Journal of Applied Physics, Vol.47, No.6, pp.5281-5286, 2008
9. Saleem Khan, Yang-Hoi Doh, Arshad Khan, Ahsan Rahman, Kyung-Hyun Choi, Dong-Soo Kim, "Direct patterning and electro spray deposition through EHD for fabrication of printed thin film transistors", Current Applied Physics, Vol.11, No.1, pp.271-S279, 2010
10. SukhanLee, DoyoungByun, SangJoonHan, Sang UkSon, YongjaeKim, Han Seo, "Electrostatic Droplet Formation and Ejection of Colloid", Micro -Nanomechatronics and Human Science and The Fourth Symposium Micro-Nanomechatronics for Information-Based Society. 2004
11. Lee Dae-young, Shin Yun-soo, Park Sung-Eun, Yu, Tae U, Hwang Jung ho, "Electrohydrodynamic Printing of Silver Nanoparticles by Using a Focused Nanocolloid jet," Applied Physics Letters, Vol.19, pp.90-92. 2007
12. Kyung-Hyun Choi, Tran Trung Thanh, Yang Bong Su, Dong-SooKim, "An new approach for intelligent control system design using the modified genetic algorithm.", International Journal of Intelligent Systems Technologies and Applications, Vol.9, No.3/4, pp. 300-315. 2010
13. L.Rayleigh, "The behavior of surface acoustic waves in homogeneous, isotropic elastic solids", London Mathematical Society, 1885
14. Colin K. Campbell, "Surface Acoustic Wave Devices for Mobile and Wireless Communications", ACADEMIC PRESS INC., pp.7-15, 1998