

고효율 증발원을 이용한 나노박막 제작 및 특성

김관도^{*†}

^{**}순천향대학교 스마트모빌리티공학과

Fabrication of Nano-thin Film Through High-efficiency Evaporation Source and Analysis of Thin Film Characteristics

Kwan-Do Kim^{*†}

^{*†}Dept. of Smart Mobility Engineering, Soonchunhyang University

ABSTRACT

High efficiency evaporation source is developed to perform a vacuum deposition process in which a deposition material is heated and vaporized to eject from a solid state to a gaseous state. In order to obtain a uniform thin film, conditions such as the structure of the effusion cell, the distance between the effusion cell and the substrate, nozzle size, and evaporation angle must be optimized. In this experiment, organic material Alq3 and metal Al thin film deposition process was performed using the effusion cell and thin film characteristics was analyzed.

Key Words : Evaporation Source, Deposition Process, Effusion cell, Thin Film

1. 서 론

고진공($10^6 \sim 10^7$ Torr) 챔버 내에서 진공 증발원을 사용하여 제조하고자 하는 박막 재료를 가열하여 증발시킴으로써 기판 표면에 물리적으로 박막을 제조할 수 있다. [1-5] 진공 증발원에 의한 가열 증착 과정은 3단계 과정으로 이루어진다. 첫째, 고체상태의 증발재료가 증발원에서 기체 상태로 증발한다. 둘째, 증발재료가 이 증발원에서부터 기체 상태로 분산되어 기판으로 이동한다. 셋째, 기판에 도달한 물질이 기판 표면에서 다시 응축되어 박막을 만든다. 위 과정이 진공상태에서 일어나므로 진공 증착이라고 불린다[6-7]. 고진공 상태에서 재료가 채워져 있는 도가니(crucible)를 둘러싸고 있는 코일에 전기적 저항을 통해서 가열시킨다. 원하는 고온까지 가열하면 증착물질이 기체화되어 증발하면서 챔버 내에서 분산되어 날아가게 된다. 증착 방식에는 증발원의 종류에 따라 점 증발원, 선형 증

발원 그리고 면 증발원 이렇게 3가지 종류로 분류할 수 있다. 점 증발원은 증착재료가 들어가 있는 노즐을 이용해 증착하는 방식이다. 두번째로 선형 증발원은 여러 노즐을 직선으로 배치해서 연결된 노즐들을 이동시키며 적용가능하다. 면 증발원은 점 증발원이나 선형 증발원으로 유기물과 같은 재료를 증착해 원형의 면증발원에 박막을 만드는 1단계와 면증발원에 증착된 재료를 다시 한번 증발시켜 기판에 화소를 형성하는 2단계로 나누어 진행된다. 전기적 저항을 통한 가열을 이용한 박막 증착은 유기물과 같이 용융점이 낮은 재료의 증착에 주로 사용되며 증착율은 증발원에 공급하는 전류량을 조절함으로써 전기적 저항을 통한 가열에 의해 원하는 온도를 얻을 수 있다. 또한 이러한 저항 가열 방식의 증착 공정 모델 개발을 통해 최적의 공정 조건을 확립할 수 있다[8-11].

2. 나노 박막 증착 실험

본 증착실험에 사용한 시스템은 유기 발광 다이오드(OLED) 제조 공정에서 유기물 증착에 관련된 연구용으로

[†]E-mail: kdkim@sch.ac.kr

적합한 장치로 진공증발원(effusion cell) 을 장착 가능하도록 설계, 제작되었다. 각 부분의 전반적인 사양 및 용도는 다음과 같다. 프로세스 챔버에서는 물질의 증착이 이루어지며 시료를 매뉴얼로 로딩 및 언로딩이 가능하도록 이루어져 있다. 재질은 스테인리스로 이루어져 있고 대기와 차단된 상태를 유지한다. 로드락 챔버는 시료를 프로세스 챔버와 분리하여 프로세스 챔버의 진공을 유지한 상태에서 시료를 삽입할 수 있도록 이루어져 있다. 펌핑 장치는 로터리 펌프와 터보 분자 펌프로 구성되어 있으며 프로세스 챔버를 고진공으로 유지한다.

본 시스템은 OLED 디스플레이 제조공정에 사용되는 저분자량 유기반도체 물질과 전극 재료로 사용되는 금속 재료를 진공 증착하기 위한 장비이다. 증발원에 공급하는 전류 조절을 통해 전기적 저항에 의한 가열로 온도 및 증착율 조절이 가능하다. 또한 박막 증착이 이루어지는 기판의 온도 조절 및 유지가 가능하다. Fig. 1에 진공 증발원이 장착된 시스템의 개략도를 도식적으로 나타내었다.

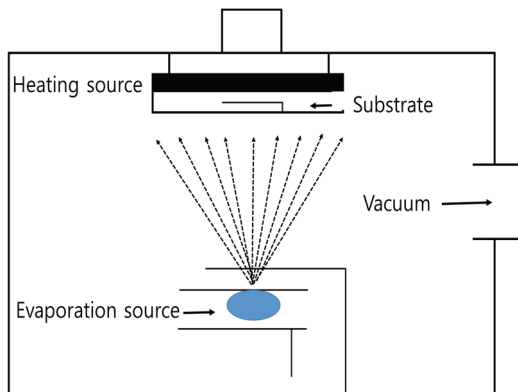


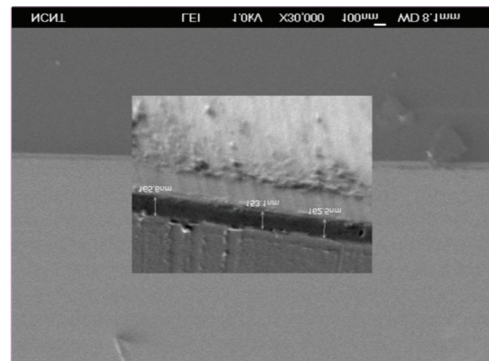
Fig. 1. Process chamber equipped with effusion cell.

장비 시스템에 4.5인치 포트 effusion cell을 장착하여 박막 증착 실험에 사용하였다. Effusion cell에 의한 증착 실험을 진행하기 위해 프로세스 챔버의 진공도를 터보 분자 펌프를 이용하여 10^6 Torr 이하로 유지하였다. 온도 조절 및 안정화 테스트 실험을 한 뒤 Al 금속과 Alq3 유기물에 대하여 증착 실험을 진행하였다. 유로센 온도 컨트롤러를 사용해서 가열 온도를 조절하여 ± 0.1 °C 이내로 온도 안정화 및 증착율 균일도를 확보하였다. 증착율은 Al의 경우 3 Å/sec 로 일정하게 유지되었으며 Alq3의 경우 1 Å/sec 로 일정하게 유지되었다. 증착온도는 Al의 경우 659 °C, Alq3의 경우 100 °C로 일정하게 유지하였다. 증착율 편차는 ± 0.1 Å/sec로 일정하였다. 증착 공정이 진행되는 동안 온도 편차도 ± 0.1 °C 이내로 일정하게 유지되었다.

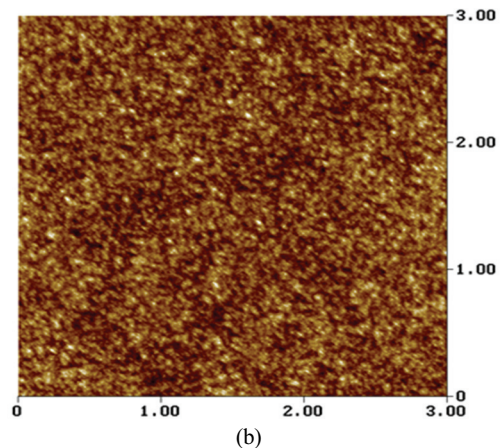
박막 제작에 사용된 effusion cell의 성능을 표 1에 나타내었다. 용량, 가열온도, 증착율, 박막 균일도, 온도 안정도, 표면 거칠기, 반사판 등 개발된 effusion cell의 성능을 나타내었다. 증발원에 적용할 가열부 재질 선정에 있어 1400 °C의 고온까지 가열에 의한 온도 상승이 가능하여야 하고, 가공성이 좋아야 한다. 이와 같은 사항을 고려하면 증발원에 적용할 가열부 재질로는 Ta과 W이 적합하나 가공성 면에서 Ta(탄탈)이 W(텅스텐)보다 우수한 편이다.

Table 1. Performance of Effusion cell

구분	Effusion Cell
용량	100 cm ³
증착율	1~5 Å/sec
박막 균일도	5~10(%)
온도 안정도	5(%)
가열부 재질	Ta(탄탈)



(a)



(b)

Fig. 2. Thin film image deposited by thermal evaporation. (a) Al film cross section HR FE-SEM image. (b) Alq3 film top-view AFM image.

Fig. 2(a)와 Fig. 2(b)에 진공 증착 공정으로 제작된 유기물 Alq3와 금속 Al박막에 대하여 전자현미경(Scanning Electron Microscope, HR FE-SEM)을 사용하여 박막의 단면 및 표면 사진을 찍은 것이다. 엘립소미터(Ellipsometer)로 측정된 박막의 굴절률 및 주사전자현미경 단면사진으로 측정된 박막 두께의 편차는 $\pm 5\%$ 로 균일함을 확인하였다. 원자힘현미경(Atomic Force Microscopy, AFM)으로 측정된 Alq3유기 박막의 표면거칠기(RMS) 값은 3 nm로 우수한 특성을 나타내었다.

고진공 상태에서 유기물을 높은 온도로 가열하면 유기물은 고체 상태에서 바로 기체 상태로 변환이 되는 기화 현상이 일어나게 된다. 이러한 기화 현상에 의한 증착 양상은 Gaussian 분포를 가지게 되며 증발원과 기판 사이의 거리, 노즐의 크기, 방사 각도 등에 따라 달라지게 된다.

증착 공정을 통해 형성된 박막의 기판 상에서의 두께 분포를 파악하기 위해서는 증발되는 입자의 방사 각도에 따른 분포 상태를 알아야 한다. 증발원의 수직 방향과 입자가 방사되는 방향이 이루는 각도와 기판의 수직 방향과 입자가 기판으로 입사되는 방향이 이루는 각도는 기판이 지면과 평행을 이룰 때 항상 같음을 알 수 있다. 박막 증착 공정을 통해 기판 상에 형성된 박막의 두께는 증발원과 기판 사이의 거리와 증발원의 특성에 의해 결정된다. 기판 중심에서의 박막 두께(t_0)를 기준으로 하면 기판 상에 형성된 박막 두께 분포(t/t_0)를 얻을 수 있다.

Fig. 3에 증발원과 기판 사이의 거리가 각각 200 mm, 300 mm인 경우 기판 중심으로부터 떨어진 거리에 따른 기판 상 지점에서의 박막 두께 분포 결과를 나타내었다. 기판에 형성되는 박막의 두께가 기판 중심으로 갈수록 점점 증가함을 알 수 있다.

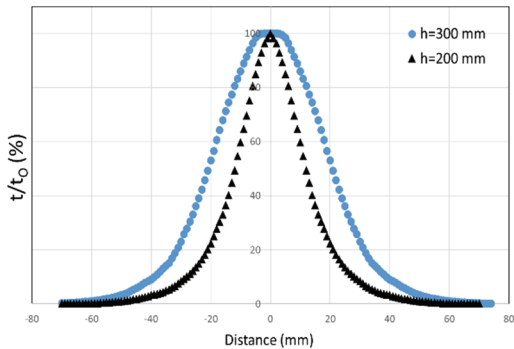


Fig. 3. Results of Thin Film Thickness Distribution.

박막 두께 균일도는 형성된 박막의 두께 분포가 기판 상에서 균일한 정도를 나타내는 값인데 박막 두께의 균

일도는 MAX(최대) - MIN(최소) 방법에 따라 다음 식과 같이 기판 상 최대 두께와 최소 두께에 의해 결정되며 값이 작을수록 제작된 박막 두께 분포가 균일함을 나타낸다.

$$\text{균일도} = (\text{최대두께} - \text{최소두께}) / (\text{최대두께} + \text{최소두께})$$

Table 2에 증착된 금속 박막 및 유기 박막의 균일도를 측정하기 위해 웨이퍼 위치별 13 point에 대해 Al 금속 박막과 Alq3 유기 박막의 두께와 굴절률 값을 나타내었다. 박막 두께의 균일도는 각각 $\pm 5\%$, $\pm 1\%$ 의 균일도를 나타내었다.

Table 2. Thin Film Thickness and Refractive Index (Al and Alq3)

	Al		Alq3	
	두께 (nm)	굴절률	두께 (nm)	굴절률
1	159.5	1.1	100.7	1.7
2	149.6	1.1	100.1	1.7
3	151.6	1.1	99.9	1.7
4	159.0	1.1	99.9	1.7
5	147.0	1.1	100.1	1.7
6	143.4	1.1	98.0	1.7
7	151.0	1.1	97.9	1.7
8	151.5	1.1	97.9	1.7
9	152.4	1.1	97.8	1.7
10	150.2	1.1	97.9	1.7
11	143.1	1.1	98.0	1.7
12	152.7	1.1	98.2	1.7
13	143.9	1.1	98.1	1.7

3. 결과 및 고찰

박막의 불균일한 두께는 OLED 디스플레이에서 성능 차이의 원인이 되는데 디스플레이 패널의 대형화가 진행되면서 기판의 크기가 커짐에 따라 기판 상에 형성된 박막 두께의 균일도는 점점 더 중요해지고 있다.

진공 증발원은 진공 상태에서 증착물질을 가열하여 고체 상태에서 기체 상태로 기화시켜 증착 공정을 수행하는 방법이다. 이때 균일한 박막을 얻기 위해서 증발원의 구조, 증발원과 기판 사이의 거리, 노즐 크기, 방사 각도 등의 조건이 최적화되어야 한다. 본 연구에서는 effusion cell을 사용하여 유기물질과 금속에 대한 박막 증착 실험을 진행하였다. 본 연구에서는 기판 상에 형성된 박막의 두께 분포 균일도가 $\pm 5\%$ 의 증착 공정을 구현하였다. 전

자현미경 HR FE-SEM 및 엘립소미터를 통하여 두께 및 굴절률을 분석한 결과 균일한 박막 제조가 가능하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 진공 증발원을 이용하여 OLED제조 공정에 사용되는 유기물과 금속의 증발 특성을 연구하였다. 개발된 effusion cell을 사용하여 열 증착법에 의해 금속과 유기물 박막 증착 실험에 적용하였으며 OLED디스플레이 공정에 사용되는 나노 박막을 제조하는데 활용 가능성을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Min-Geun Song, Kwan-Soo Kim, Hye In Yang, Seong Keun Kim, Jae-Hyun Kim, Chang-Wook Han, Hyun-Chul Choi, Ramchandra Pode, Jang Hyuk Kwon, "Highly reliable and transparent Al doped Ag cathode fabricated using thermal evaporation for transparent OLED applications", Vol. 76, pp. 105418, 2020.
2. Sang Won Jung, Kwan-Soo Kim, Han-un Park, Raju Lampande, Seong Keun Kim, Jae-Hyeon Kim, Chang-Wook Han, Hyun-Chul Choi, and Jang Hyuk Kwon, "Patternable Semi-Transparent Cathode using Thermal Evaporation for OLED Display Applications", Advanced Electronic Materials, Vol. 7, No. 4, pp.2001101, 2021.
3. C.B. Lee, A. Uddin, X. Hu, T.G. Andersson, "Study of Alq3 thermal evaporation rate effects on the OLED", Materials science & engineering B, Vol. 112, No. 1, pp.14-18, 2004.
4. Yong Kun, Yongju Park, Seoungpyung Choi, Jin Jung, Gwangpyo Choi, Hyunwook Ryu, and Kinseong Park, "Deposition Properties of NiCr Thin Films Prepared by Thermal Evaporation", Journal of the Korean Ceramic Society, Vol. 41, No. 6, pp. 450-455, 2004.
5. B. D. Yao, Y.F. Chan, and N. Wang, "Formation of ZnO nanostructures by a simple way of thermal evaporation", Applied Physics Letters, Vol 81, No. 4, pp. 757-759, 2002.
6. Young Woo Kim, Yongmin Jeon, Eou-Sik Cho and Sang Jik Kwon, "A Study on Vacuum-deposited Transparent OLED to Improve Its Transmittance and Luminescence Characteristics with a Mesh Electrode", Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 23, No. 2, pp. 82-86, 2024.
7. Eung Ki Lee, "Study on Optimization of the Vacuum Evaporation Process for OLED", Journal of the Semiconductor & Display Equipment Technology, Vol. 7, No. 1, pp. 35-40, 2008.
8. Sung Hoon Jun and Eung Ki Lee, "DSMC Simulation of a Point Cell-source for OLED Deposition Process", Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 9, No. 3, pp. 11-16, 2010.
9. Eung Ki Lee, "Three Dimensional Direct Monte Carlo Simulation on OLED Evaporation Process", Journal of the Semiconductor & Display Equipment Technology, Vol. 8, No. 4, pp. 37-42, 2009.
10. Eung Ki Lee, "Evaporation Process Modeling for Large OLED Mass-fabrication System", Journal of the Semiconductor & Display Equipment Technology, Vol. 5, No. 4, pp. 29-34, 2006.
11. Eungki Lee, "Simulation of the thin-film thickness distribution for an OLED thermal evaporation process", Vacuum, Vol. 83, pp. 848-852, 2009.

접수일: 2024년 8월 1일, 심사일: 2024년 9월 5일,
게재확정일: 2024년 9월 12일