

유기EL 증착 공정을 위한 박막 형성 모델링

이웅기*(순천대학교 기계자동차공학부)

Geometric Modeling of Thin-film Thickness Profile for the OLED Evaporation Process

Eung-ki Lee (School of Mechanical and Automotive Eng., Sunchon National University)

ABSTRACT

For the OLED evaporation process, thin film thickness uniformity is of great practical importance. In order to achieve the better thickness uniformity, geometric simulation of film thickness distribution profile is required. In this paper, a geometric modeling algorithm is introduced for process simulation of full-color OLED evaporating system. The physical fact of the evaporation process is modeled mathematically. Based on the developed method, the uniformity of the organic layer thickness can be successfully controlled.

Key Words : OLED (유기EL), Evaporation (증착), Thin Film (박막), Geometric Modeling (형상 모델링)

1. 서론

최근 정보화 사회로의 움직임이 더욱 가속화되고 있으며 이에 따라 정보 디스플레이의 중요성이 점점 증대하고 있다. 정보 디스플레이는 CRT로부터 평판 디스플레이(FPD; Flat Panel Display)로 점차 옮겨가는 추세이며, 유기EL(OLED; Organic Luminescent Emitting Device) 디스플레이는 저전압 구동, 자기 발광, 경량 박형, 광시야각, 그리고 빠른 응답 속도 등의 장점 때문에 세계적으로 많은 연구 및 개발이 진행되고 있다.

유기EL 디스플레이는 일반적으로 양극(anode), 정공 수송층(HTL), 발광층(EML), 전자 수송층(ETL), 그리고 음극(cathode) 등의 다층 박막으로 구성되어 있으며, 이러한 박막층들은 진공 증착법에 의하여 형성된다.[1] 일반적으로 저항 가열 방식의 증발원을 이용하여 증착하는데, 증착 공정 조건 중에서 박막 두께 분포의 균일도가 기본적으로 확보되어야 한다. 박막 두께의 불균일은 휘도, 색도 등의 성능의 차이의 원인이 될 수 있다. 또한, 기판의 크기가 확대됨에 따라 박막 균일도는 점점 더 중요한 공정 요건이 되어가고 있다.

기판 위에 응축되는 박막의 두께 분포는 가능한 한 균일하게 분포하는 것이 바람직하다. 본 연구에서 유기EL 생산을 위한 저항 가열 회전 방식의 증착 공정의

물리적 현상 등을 표현할 수 있는 공정 모델링을 수행한다. 증착 공정은 증발원의 재료가 가열, 증발되어 응축 성막되는 공정으로, 증발 입자의 방향 분포는 증발원(evaporation cell)에 주로 영향을 받는 것으로 알려져 있다. (Fig. 1)

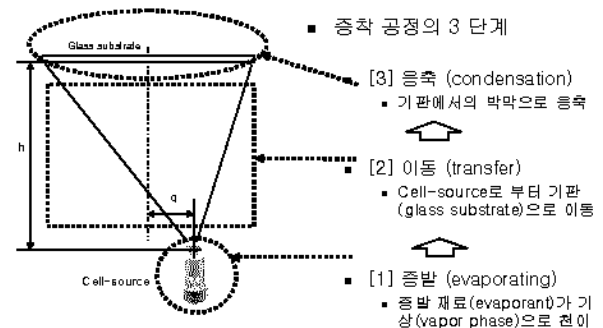


Fig. 1 Evaporation process

본 연구는 1회에 약 4~5 시간 정도 소요되는 증착 실험을 컴퓨터 시뮬레이션으로 대체하기 위하여 증착 공정의 물리적 현상을 표현하기 위한 공정 모델을 개발한다. 증착 공정을 컴퓨터 시뮬레이션으로 대체

함으로써, 단시간에 최적 공정 조건을 확립할 수 있도록 한다. 생산 설비 설계 및 납기의 혁신적인 단축이 기대되며, 보다 빠른 납기로 인하여 제품 개발 및 생산 경쟁력에서 우위를 확보할 수 있게 된다.

2. 증발원 방사 모델

증발원(cell-source)으로부터 증발하는 입자는 증발원의 온도에 상응하는 역학적 에너지를 가지고 증발한다.[2] 증착 공정에서의 박막 두께 분포의 모델링을 위하여 증발되는 입자의 방향 분포를 파악하는 것이 무엇보다 중요하다.

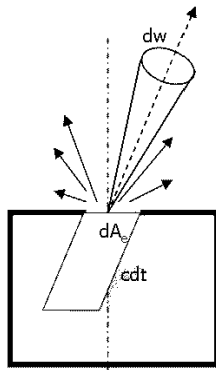


Fig.2 Effusion modeling of ideal point cell-source

점증발원의 방사분포 모델링에 관한 많은 연구가 이루어졌으며, 이상적인 점증발원으로서 밀폐된 공간에 극히 작은 구멍이 있는 형태의 증발원에서 미세한 구멍 dA_e 를 통하여 증발 입자가 방출되는 경우 dt 시간 동안 면적 dA_e 를 통하여 기출어진 체적 내의 입자 분율은 식(1)과 같다.[3, 4]

$$cdt \cos \phi dA_e \frac{1}{V} \quad (1)$$

방향에 따른 입자 분율로부터 방사 각도에 따른 증발 입자의 분포는 식(2)와 같이 계산된다.

$$dM_e(\phi) = M_e \cos \phi \frac{d\omega}{\pi} \quad (2)$$

이러한 가정으로부터 증발 입자의 분포는 실험으로부터 진공 증착 공정에서 점증발원의 증발 현상은 cosine 함수의 n제곱으로 표현할 수 있음이 알려져 있다.[5] 방사 각도에 대한 증발 입자의 방향에 따른 입자 분포는 고체각(solid angle, α)에

대하여 식(3)과 같이 표현될 수 있다. (Fig. 3)

$$m_\alpha = m_0 \cos^n \alpha \quad (3)$$

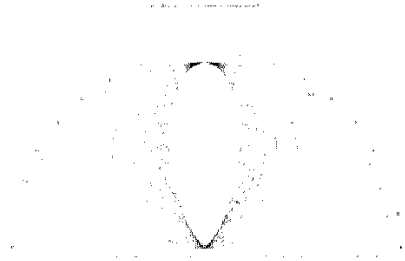


Fig. 3 The effusion distribution profiles of the various evaporation sources

3. 박막 두께 모델링

3.1 증착 시스템

유기EL 증착 공정에서 주로 채택되는 회전 증착 공정 시스템은 (Fig. 4)에서 도시된 것과 같은 구조를 갖는다.

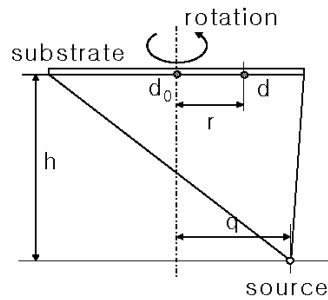


Fig. 4 Geometrical representation of an evaporation equipment

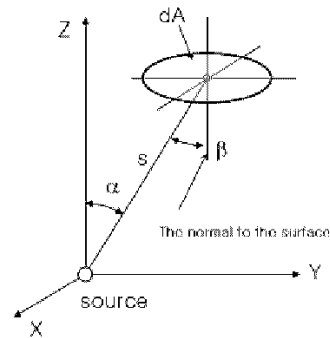


Fig. 5 Geometrical representation of an evaporation equipment

박막 균일도 분포에 대한 해석을 위하여 공간에 위치한 미소 면적 dA 를 가정한다. 이 미소 면적에 응축되는 성막량을 계산하기 위하여 (Fig. 4)의 증착 시스템을 (Fig. 5)와 같이 기하학적으로 나타낼 수 있다.

3.2 박막 두께 분포 모델링

공간에서 임의의 위치와 방향을 갖는 미소 면적 dA 에 대한 고체각(ω)은 식(4)와 같이 계산된다.

$$d\omega = (\cos\beta dA)/s^2 \quad (4)$$

각 β 는 기판(substrate)의 중심과 미소 체적의 법선 방향(normal direction)과의 각도이고, s 는 미소 체적과 증발원과의 거리이다. 미소 체적의 자세는 각도 α , β 와 거리 s 로 정의될 수 있다.

증발 입자가 고체각(ω)의 방향에서 미소 체적 dA 에 형성되는 박막 두께의 계산을 위하여 질량, 밀도, 체적 그리고 박막 두께의 관계는 개념적으로 식(5)와 같이 표현될 수 있다.

$$dm = \rho dV = \rho dA \quad (5)$$

dA 를 치환함으로써 식(6)과 같은 미소 체적에서의 박막 두께 계산식을 얻게 된다.

$$d = \frac{m(\omega) d\omega}{\rho dA} = \frac{m(\omega) \cos\beta}{\rho s^2} \quad (6)$$

기판 중심에서의 박막 두께는 기판의 회전 증착 공정 중에 두께가 변하지 않는 위치이므로 이 위치에서의 박막 두께를 이용하여 다른 위치에서 박막 두께를 표현함으로써 식(7)과 같이 박막 두께 분포를 무차원화할 수 있다.

$$\frac{d}{d_0} = \left(\frac{s_0}{s}\right)^2 \left(\frac{\cos^n \alpha \cos \beta}{\cos^n \alpha_0 \cos \beta_0}\right) \quad (7)$$

반경 r 의 크기를 갖는 기판이 회전하는 증착 시스템에서 기판의 회전 중심으로부터 바깥쪽으로 위치한 증발원의 거리를 q 로 표현하였다. 증발원으로부터 기판의 거리는 h 로 나타낸다. 회전 증착 공정에서 무차원화된 박막 두께 분포를 해석적으로 계산할 수 있다.

$$d = d_0 \left(\frac{s_0}{s}\right)^2 \left(\frac{\cos^n \alpha \cos \beta}{\cos^n \alpha_0 \cos \beta_0}\right) \quad (8)$$

식(8)은 증착 공정에서 증발원으로부터 방출된 입자가 평면 기판 위에 증착되는 박막 두께 분포를 표현하고 있는 계산식으로 기판의 회전이 반영되지 않은 결과이다. 회전 증착 공정에서의 박막 두께 분포를 표현하기 위하여 식(8)을 기판 회전 방향으로 적분함으로써 식(9)와 같이 표현이 가능하게 된다.

$$\frac{D}{D_0} = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \frac{d}{d_0} d\varphi = \left[1 + \left(\frac{q}{h}\right)^2\right]^{\frac{n+2}{2}} \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \frac{d\varphi}{\left[\left(\frac{r}{h}\right)^2 - 2\left(\frac{r}{h}\right)\left(\frac{q}{h}\right)\cos\varphi + \left(\frac{q}{h}\right)^2 + 1\right]^{\frac{n+2}{2}}} \quad (9)$$

회전 증착 공정의 결과 형성되는 박막 두께 분포는 회전축을 기준으로 축대칭 형상을 가지며, 기판과 증발원의 상대 위치의 관계인 (r/h) , 그리고 증발원의 방사 분포를 표현하는 n 값의 함수로 표현됨을 알 수 있다. (Fig. 6)

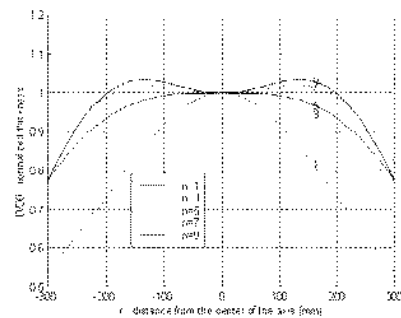


Fig. 6 Film thickness distribution profile as function of various cosine exponents n

3.3 방사 특성 값 : n

박막 두께 분포를 계산하기 위하여, 증발원의 방사 특성을 표현하는 지수 값인 n 값의 추정을 위한 과정이 요구된다. 본 연구에서는 증발원을 사용한 공정 실험으로부터 측정된 성막량으로부터 역으로 n 값을 추정하는 과정을 적용한다.

두께 분포 데이터를 식(10)의 형태의 코사인 함수로 근사시킴으로써 지수 n 값을 추정할 수 있다.

$$y = \cos^n(x) \quad (10)$$

증착 공정 실험으로부터 측정된 박막 두께 데이터에 대한 코사인 함수의 근사를 위하여, 본 연구에서는 최소 자승법(Least Square Method)을 이용하여 근사 오차를 최소화 한다. 본 연구에서는 삼각함수에 지수가 결합되어 있는 코사인 함수에 로그(logarithm)를 적용함으로써 최소 자승법의 적용이 용이한 식(11)의 형태를 사용한다.

$$Y_i = \ln t_i, \quad X_i = \ln \cos \alpha_i \quad (11)$$

식(11)을 이용하여 오차 제곱의 합을 식(12)의 오차 함수로 정의할 수 있다.

$$E = \sum_{i=1}^n (n \ln \cos \alpha_i - \ln t_i)^2 \\ = \sum_{i=1}^n (nX_i - Y_i)^2 \quad (12)$$

오차를 최소화하기 위하여 식(13)과 같이 오차 함수를 편미분하여 n 값을 계산할 수 있다.

$$\frac{\partial E}{\partial n} = \sum_{i=1}^n 2X_i(nX_i - Y_i) = 0 \quad (13)$$

최소 자승법으로 측정된 박막 두께분포로부터 방사 분포 특성 값인 n을 추정할 수 있다. (Fig. 7)

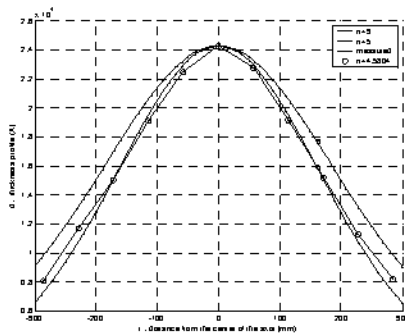


Fig. 7 Cosine fitting of the effusion distribution profile

추정된 n 값으로부터 목표 사양(specification)

을 만족하는 증발원 위치를 선정한다. (Fig. 8)에 도시된 바와 같이 탐색(search) 기법을 적용하여 최적의 증발원 위치를 선정한다.

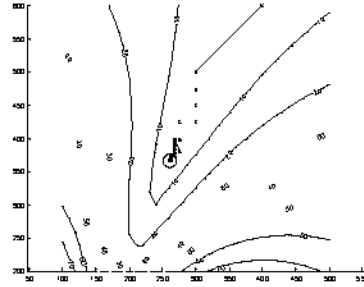


Fig. 8 Searching the optimum cell-source position

4. 결론

본 연구에서 유기EL 생산을 위한 저항 가열 회전 방식의 증착 공정의 물리적 현상을 표현할 수 있는 공정에 대한 형상 모델링을 수행하였다. 개발된 형상 모델링을 이용함으로써 증착 공정을 컴퓨터 시뮬레이션으로 내지할 수 있도록 함으로써, 단시간에 최적 공정 조건을 확립할 수 있다.

컴퓨터 시뮬레이션으로 유기EL 박막 두께 분포를 예측하였으며, 각종 공정 조건을 만족하는 증발원의 최적 위치를 선정하였다. 증착공정 결과로부터 공정 사양을 만족하고 있음을 확인하였다.

납기의 혁신적인 단축이 기대되며, 보다 빠른 납기로 인하여 제품 개발 및 생산 경쟁력에서의 우위 확보를 기대할 수 있다.

후기

이 논문은 2004년도 지역대학 혁신역량 강화사업(NURI)에 의하여 지원되었음.

참고문헌

1. Maissel Glang, Handbook of the Thin Film Technology, McGraw-Hill, USA, pp 1-55 (1970)
2. H. K. Pulker, Coating on Glass, Elsevier Science Publishing Co., New York, USA (1987)
3. A. MacLeod, thin Film Optical Filters, Adam Hilger Ltd, London (1969)
4. K. H. Behndt, R. E. Thun, Physics of Thin Films, Vol. 3, Academic Press, New York (1966)
5. M. Ohring, The material science of thin film, Academic press, USA (1992)