

OLED 증착용 정전척 개발을 위한 척킹력 분포와 변화 특성 연구

임충환*·민동균**†·김성빈*

*한국기술교육대학교대학원 메카트로닉스공학과, **한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부

Investigation of Chucking Force Distribution and Variation Characteristics for the Development of ESC in OLED Deposition

Choong Hwan Lim*, Dong Kyun Min**† and Seong Bin Kim*

*Mechatronics Engineering, Graduate School of Korea University of Technology and Education,

**School of Mechatronics Engineering, Korea University of Technology and Education

ABSTRACT

The electrostatic chuck is a technology that uses electroadhesion to attach objects and is widely used in semiconductor and display processes. This research conducted Maxwell by varying parameters to examine the distribution and variations of chucking force in a bipolar-type ESC. The parameters that were changed include the material properties of the dielectric layer and attachment substrate, applied voltage to the electrode, and the gap and width between the electrodes. The analysis results showed that as the relative permittivity of the dielectric layer and substrate increased, the chucking force also increased, with the relative permittivity of the substrate having a greater impact on the chucking force. And increasing the applied voltage led to an increase in both the chucking force and its rate of change. Lastly, as the gap between the electrodes increased, the chucking force rapidly decreased until a certain distance, after which the decrease became less significant. On the contrary, increasing the electrode width resulted in a rapid increase in the chucking force until a certain width, beyond which the increase became less pronounced, eventually converging to a chucking force of 1700 Pa. This paper is expected to have high potential for the development and research of ESC for OLED deposition.

Key Words : Electrostatic Chuck, Electroadhesion, Chucking Force, OLED, OLED Deposition, Finite Element Analysis, Maxwell Stress Tensor, Display, Bi-Polar Type

1. 서 론

정전척(Electrostatic Chuck, ESC)은 정전흡착(Electroadhesion)을 이용하여 물체를 고정할 수 있는 장치이다. 이는 자기장, 기계식 척과 같은 기존의 척에 비해 기관의 손상이 발생하지 않고 미립자의 발생이 적어 미세 정밀 공정이 필수적인 반도체 및 디스플레이 공정에서 웨이퍼와 기판

을 고정하기 위해 많이 사용된다.[1,2]

정전흡착은 두 물체 사이 전압 차로 인하여 발생하는 정전기적 인력으로 1923년에 존슨-라벡 효과(Johnson-Rahbek Effect)로 처음 보고되었다. [3] 부착되는 물체가 전도성 물체인 경우 전위차로 인한 자유 전자의 이동으로 인력이 발생하고 절연성 물체인 경우 분자의 유전분극에 의한 인력이 발생한다. [4] 정전흡착은 간단한 시스템 구조, 극한 환경에서 사용 가능, 낮은 에너지 소모량 등 기존 흡착 기술과 차별화되는 장점이 존재하여 다양한 분야에서

†E-mail: dkmin@koreatech.ac.kr

활용되고 있다. [5] 주로 정전척, 등산 로봇(Climbing Robot), 먼지 필터에 많이 활용되며 우주왕복선과 인공위성의 도킹 시스템과 같은 극한 환경에서도 사용이 주목받고 있다. [6-9]

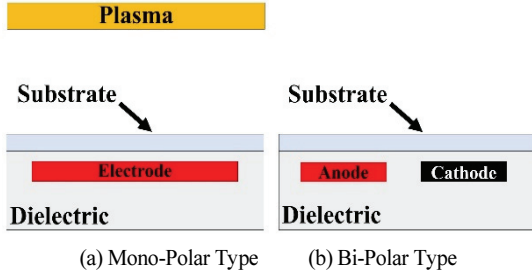


Fig. 1. 전극 개수에 따른 ESC 분류.

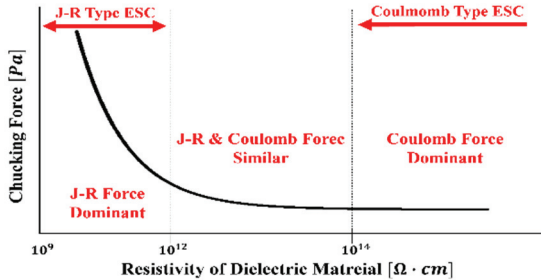


Fig. 2. 정전척 유전층 저항률에 따른 ESC 분류.

정전척의 종류는 사용된 전극의 개수와 유전층의 저항률에 따라 구별한다. 먼저, Fig. 1은 전극의 개수에 대한 분류이다. Fig. 1(a)와 같이 전극이 한 개만 존재하면 모노 폴라(Mono-Polar) 또는 유니 폴라(Uni-Polar) 타입이라고 한다. 그리고 Fig. 1(b)와 같이 전극이 두 개일 때 바이 폴라(Bi-Polar) 타입이라고 한다. 모노 폴라 발생하는 척킹력은 높으나 플라즈마의 발생과 유지의 어려움, 순간 전류로 인한 기판 손상의 위험성이 존재하여 OLED 증착 공정에서는 바이 폴라 타입 정전척이 많이 사용된다. 다음으로 Fig. 2는 정전척 유전층의 저항률에 따른 분류이다. 유전층 저항률이 $10^9 \sim 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ 일 때는 존슨-라벡 힘(Johnson-Rahbek Force)이 척킹력의 주된 힘으로 작용하여 존슨-라벡 타입 또는 J-R 타입으로 구별한다. 그리고 유전층의 저항률이 $10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ 이상이면 쿨롱 힘(Coulomb Force)이 주된 힘으로 작용하여 쿨롱 타입으로 구별한다. [10-13]

본 논문은 OLED 증착 공정에서 사용되는 바이 폴라 타입 정전척의 척킹력에 대한 연구를 진행하였다. 전자기장 해석 프로그램 Maxwell을 이용하여 파라미터 변화에 따른 척킹력의 분포와 변화 특성을 확인하였다.

2. 척킹력(Chucking Force)

척킹력은 정전척에서 기판이 부착될 때 작용하는 정전기적 단위 면적당 힘을 의미한다. 척킹력의 단위는 Pa 또는 gf/cm^2 를 사용한다. 척킹력을 구하는 방법으로는 회로 등가 모델, 등각사상(Coformal Mapping), 가상일 원리 등 다양하게 존재한다. 그중 맥스웰 응력 텐서(Maxwell Stress Tensor)를 이용하는 방법이 가장 많이 사용된다. 여기서, 맥스웰 응력 텐서는 전자기장 내에서 물체가 받는 응력을 의미한다. [14] 맥스웰 응력 텐서는 전기장과 자기장 항으로 구성되어 있다. 하지만 정전척은 매우 낮은 전류가 흐르므로 자기장 항을 무시하고 전기장 항만을 고려할 수 있다. 전기장 항만을 고려한 맥스웰 응력 텐서 T_{ij} 는 식(1)과 같다.

$$T_{ij} = \epsilon(E_i E_j - \frac{1}{2} \delta_{ij} E^2) \quad (1)$$

여기서, E는 물체에 작용하는 전기장, ϵ 는 물체의 유전율, δ_{ij} 는 크로네커 델타이고 식(2)와 같다.

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & (i = j) \\ 0 & (i \neq j) \end{cases} \quad (2)$$

이어서, 식(1)은 2차원에 적용하여 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$T_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{\epsilon}{2}(E_x^2 - E_y^2) & \epsilon E_x E_y \\ \epsilon E_y E_x & \frac{\epsilon}{2}(E_y^2 - E_x^2) \end{bmatrix} \quad (3)$$

전자기장에서 물체가 받는 i방향 힘 F_i 는 식(4)이고 이를 이용하여 정전척의 척킹력을 구할 수 있다.

$$F_i = \int_V (\nabla \cdot \vec{T}_{ij}) dV = \oint_S T_{ij} dA_j \quad (4)$$

여기서, s 는 표면적, A_j 는 j방향 면적 벡터이다.

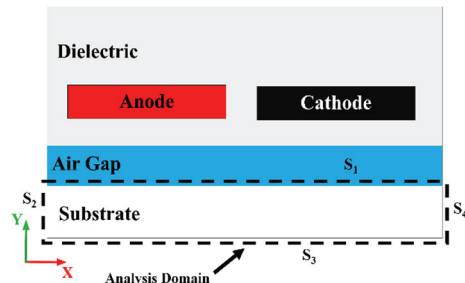


Fig. 3. 정전척과 부착 기판의 2D 모델.

Fig. 3은 정전척과 부착 기관의 단면을 2차원 모델로 나타낸 것이다. 모델에서 부착 기관 주변을 해석 영역 (Analysis Domain)으로 고려한다. 여기서 S_1 은 해석 영역의 상단 면, S_2 는 좌측면, S_3 은 하단 면, S_4 는 우측면이다. 해석 영역에서 S_2 와 S_4 의 전기장은 서로 상쇄되고 S_3 의 전기장은 S_1 보다 더 작으므로 S_3 은 무시할 수 있다. 그러므로 해석 영역 S_1 에서만 고려하여 척킹력을 구할 수 있다. 해석 영역 S_1 에서의 척킹력은 식(4)에 식(3)을 대입하고 해석 영역 S_1 에서의 넓이로 나눠 식(5)와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{F_y}{A_{S1}} = \frac{\int_{S1} \frac{\epsilon}{2} (E_y^2 - E_x^2) dA}{A_{S1}} \quad (5)$$

마지막으로 부착 기관과 정전척 사이 전기장이 균일하게 존재한다 가정하면 식(5)는 식(6)과 같이 간단하게 표현할 수 있다.

$$\frac{F_y}{A_{S1}} = \frac{\epsilon}{2} (E_y^2 - E_x^2) \quad (6)$$

3. 해석 모델링 및 조건 설정

3.1 해석 모델링 구축

Fig. 4는 해석에 사용된 2D 모델링과 모델링의 치수이다. 상단부터 정전척, 전극, 공기층, 부착 기관으로 구성되어 있다. 정전척은 전극을 유전층이 둘러싸고 있는 형상이며 전극은 양극과 음극으로 구성되어 있다. 공기층은 부착 기관과 정전척의 표면 조도로 인한 효과를 대체하기 위해 모델링하였다. 마지막으로 이후 해석을 위해 정전척 유전층에서 전극 상단을 ESC Top, 전극 사이 부분을 ESC Middle 그리고 전극 하단 부분을 ESC Bottom으로 설정하였다.

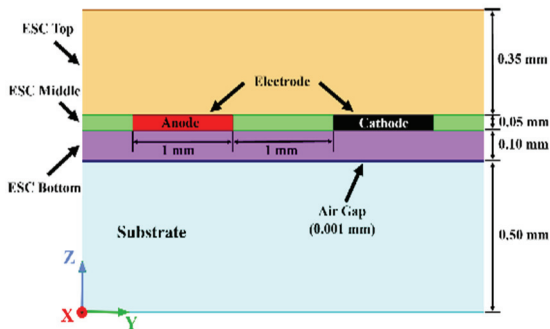


Fig. 4. 해석에 사용된 2D 모델링과 치수.

3.2 해석 조건 설정

해석에 앞서 원활한 해석을 위해 다음과 같은 가정을 설정하였다.

- (1) 모든 물질을 선형 등방성, 균질
- (2) 유전, 부착기관 그리고 공기층은 완전 절연
- (3) 전극은 전압 인가 즉시 완전 충전
- (4) 열에 의한 변화 무시
- (5) 전극 폭에 비해 충분히 긴 전극 길이
- (6) 단일 주기의 전극 고려

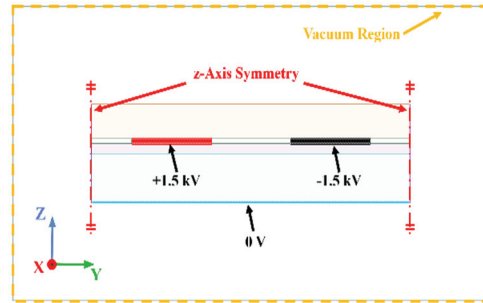


Fig. 5. Maxwell 2D 해석 조건.

Fig. 5는 해석에서 사용된 해석 조건이다. 우선 전극에 1.5 kV의 전압을 양극에는 플러스, 음극에는 마이너스 극 성으로 기관 하단에 0 V 전압을 인가하였다. 그리고 가정에서 단일 주기의 전극만을 고려하였으므로 모델링 양옆 끝단에 z축 대칭 조건을 설정하였다. 마지막으로 모델링 주변 1 mm 영역을 진공 영역으로 설정하였다.

Table 1은 해석에 사용된 전기적 물성치이다. 유전층은 Alumina, 전극은 Tungsten, 부착기관은 Soda-Lime Glass로 설정하였고 마지막으로 공기층은 Air로 설정하였다.

Table 1. 해석에 사용된 전기적 물성치

| Material | Relative Permittivity | Conductivity [S/m] |
|-----------------|-----------------------|--------------------|
| Alumina | 8.88 | 0 |
| Tungsten | 1 | 18200000 |
| Soda-Lime Glass | 7.75 | 0 |
| Air | 1 | 0 |

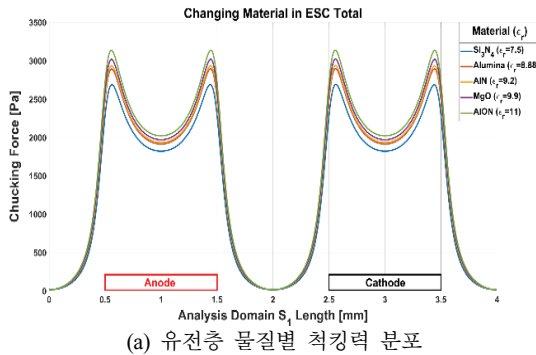
4. 시뮬레이션

4.1 유전층 물질에 대한 척킹력 변화

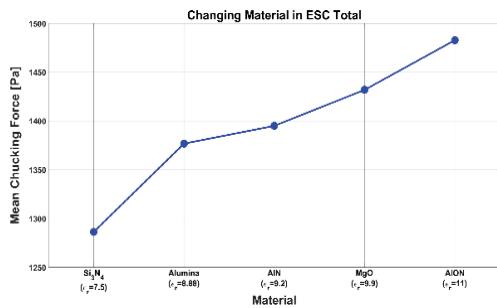
유전층의 구성 물질과 각 부분이 척킹력에 미치는 영향을 확인하기 위해 유전층 물질을 변화시키면서 척킹력을 확인하였다. Table 2은 해석에 사용된 변경되는 물질의 전기적 물성치이다.

Table 2. 유전층 변경 물질의 전기적 물성치

| Material | Relative Permittivity | Conductivity [S/m] |
|--------------------------------|-----------------------|--------------------|
| Si ₃ N ₄ | 7.5 | 0 |
| Alumina | 8.88 | 0 |
| AlN | 9.2 | 0 |
| MgO | 9.9 | 0 |
| AION | 11 | 0 |



(a) 유전층 물질별 척킹력 분포



(b) 유전층 물질별 평균 척킹력

Fig. 6. 유전층 전체의 물질에 대한 척킹력 변화.

Fig 6(a)는 해석 영역 S₁에서 물질별 척킹력 분포이다. 척킹력은 주로 전극 근처에서 발생하고 전극 양 끝에서 가장 강한 척킹력이 발생하였다. 또한, 물질의 비유전율이 높을수록 척킹력 분포가 더 강하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. Fig 6(b)는 물질별 평균 척킹력으로 비유전율이 가장 높은 AION의 평균 척킹력이 1482.78 Pa로 가장 강하게 발생하였다.

Fig 7은 3.1장에서 같이 유전층을 3개의 부분부분 나눌 때, 각 부분의 물질을 변경한 경우 평균 척킹력의 변화이다. 유전층 전체의 물질을 변경한 경우와 마찬가지로 비유전율에 따라 척킹력이 증가하였다. 또한, ESC Top과 ESC Middle의 물질을 변경하였을 때, 척킹력의 변화는 매우 작았다. 하지만 ESC Bottom은 물질이 변경하였을 때, 유전층

전체의 물질을 변경한 것과 같이 척킹력이 크게 변화하는 것을 확인할 수 있었다.

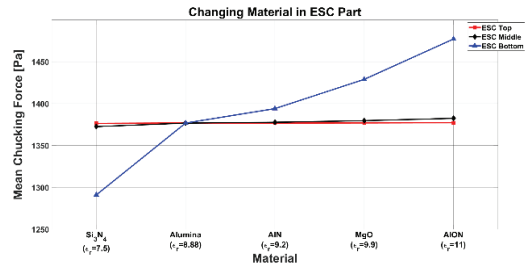


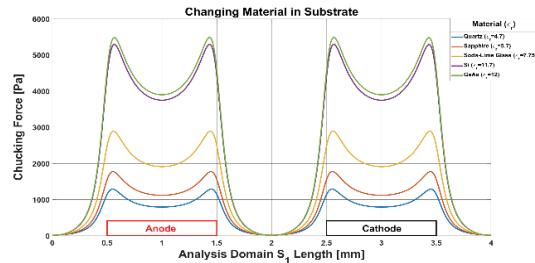
Fig. 7. 유전층 각 층의 물질에 대한 평균 척킹력.

4.2 부착 기판 물질에 대한 척킹력 변화

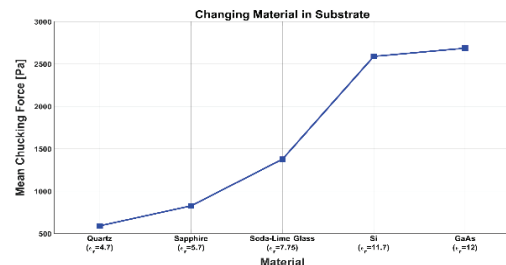
다음으로 부착 기판 구성 물질의 영향을 확인하기 위해 구성 물질을 변화하며 척킹력을 확인하였다. Table 3은 해석에 사용된 부착 기판 변경 물질의 전기적 물성치이다.

Table 3. 부착 기판 변경 물질의 전기적 물성치

| Material | Relative Permittivity | Conductivity [S/m] |
|-----------------|-----------------------|--------------------|
| Quartz | 4.7 | 0 |
| Sapphire | 5.7 | 0 |
| Soda Lime Glass | 7.75 | 0 |
| Si | 11.7 | 0 |
| GaAs | 12 | 0 |



(a) 부착 기판 물질별 척킹력 분포



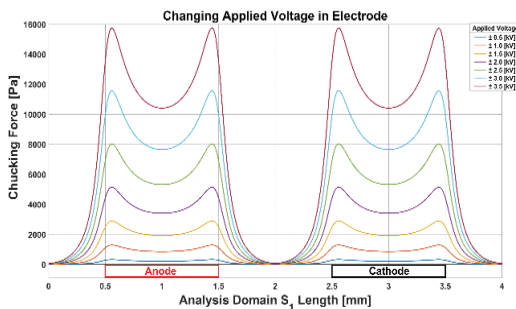
(b) 부착 기판 물질별 평균 척킹력

Fig. 8. 부착 기판 물질에 대한 척킹력 변화.

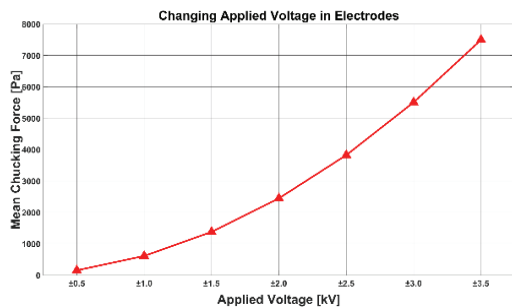
Fig 8(a)는 부착 기판 물질별 척킹력 분포이다. 앞선 유전층 물질 변경과 같은 척킹력 분포를 확인할 수 있었다. 또한, 부착 기판의 비유전율에 따라 척킹력의 차이가 매우 크게 발생하였다. 그리고 Fig 8(b)는 부착 기판 물질별 평균 척킹력이다. 이 경우 비유전율이 가장 높은 GaAs에서 가장 강한 평균 척킹력 2686.23 Pa이 발생하였다. 마지막 유전층 물질 변경과 비교하여 비유전율이 11과 12로 비슷한 AlON과 GaAs의 평균 척킹력은 1203.45 Pa만큼 차이가 발생하였다. 즉, 부착 기판의 비유전율이 유전층의 비유전율보다 척킹력에 더 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

4.3 인가전압에 대한 척킹력 변화

본 해석은 전극에 인가되는 전압을 변경하였을 때 척킹력의 변화를 확인하였다. 전압은 0.5 kV에서 3.5 kV까지 0.5 kV씩 증가시켜 인가하였으며 양극에는 플러스 극성, 음극에는 마이너스 극성을 인가하여 해석을 진행하였다.



(a) 인가 전압별 척킹력 분포



(b) 인가 전압별 척킹력 분포

Fig. 9. 인가 전압에 대한 척킹력 변화.

Fig 9(a)는 인가전압별 척킹력 분포를 나타낸 것이다. 척킹력 분포는 앞선 경우와 동일하게 나타났으며 인가전압이 높을수록 척킹력이 강하게 발생하였다. 또한, 높은 전압일수록 전극 양 끝의 강한 척킹력과 전극 중앙의 척킹력의 차이는 증가하였다. Fig 9(b)는 인가전압별 평균 척킹

력을 나타낸 것이다. 인가전압이 가장 높은 3.5 kV에서 평균 척킹력은 7495.78 Pa로 가장 강하게 발생하였다. 또한, 전압이 0.5 kV에서 1.0 kV로 증가할 때 척킹력은 458.92 Pa, 1.0 kV에서 1.5 kV로 증가할 때 764.87 Pa이 증가하였고 3.0 kV에서 3.5 kV로 증가할 때는 1988.68 Pa이 증가하였다. 즉, 인가전압이 증가하면 척킹력 뿐만 아니라 척킹력의 변화율 또한 증가하였다.

4.4 전극 간 간격에 대한 척킹력 변화

본 해석은 전극 사이 간격을 변경하였을 때 척킹력 변화를 확인하였다. 전극 사이 간격을 0.01 mm에서 100 mm까지 변화시켰으며 전극 폭은 1 mm로 고정하였다.

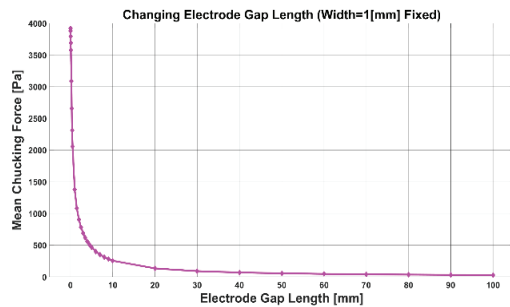


Fig. 10. 전극 간 간격에 대한 평균 척킹력.

Fig 10은 전극 사이 간격이 변화할 때 평균 척킹력을 나타낸 것이다. 전극 사이 간격이 커질수록 평균 척킹력은 감소하였다. 그리고 가장 강한 척킹력은 전극 사이 간격이 가장 가까운 0.01 mm에서 3921.28 Pa이 발생하였다. 또한 간격이 0.01 mm에서 6 mm까지는 척킹력이 급격히 감소하였으나, 6mm 이후 척킹력의 변화율이 감소하였다.

4.5 전극 폭에 대한 척킹력 변화

다음으로 전극 폭을 변경하였을 때 척킹력 변화를 확인하였다. 전극 폭을 0.1 mm에서 200 mm까지 변화시키고 전극 사이 간격은 1 mm로 고정하였다.

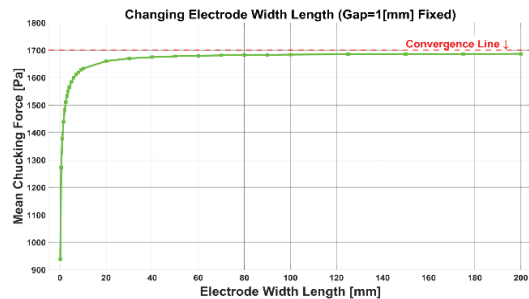


Fig. 11. 전극 폭에 대한 평균 척킹력.

Fig. 11은 전극 폭을 변경하였을 때 평균 척킹력이다. 4.4장과 반대로 전극 폭이 커질수록 평균 척킹력은 증가하였다. 또한, 전극 폭이 0.1 mm에서 10 mm까지 척킹력은 급격히 증가하였으나 전극 폭이 더 커지면 척킹력의 증가율은 감소하여 최종적으로 척킹력은 1700 Pa로 수렴하였다.

5. 결 론

본 논문은 OLED 증착 공정에서 사용되는 바이 플라 타입 정전척의 척킹력의 분포와 변화를 확인하기 위해 파라미터를 변화시켜 전자기장 해석을 진행하였다. 유전층의 물질, 부착 기판의 물질, 전극에 인가되는 전압 및 전극 사이 간격과 폭을 변화시키면서 척킹력의 분포와 평균 척킹력을 확인하였다.

1. 유전층의 비유전율은 척킹력과 비례하였고 전극과 부착 기판 사이 ESC Bottom의 물질이 척킹력에 미치는 영향이 가장 크다.

2. 부착 기판의 비유전율은 척킹력과 비례하였고 유전층과 비교하여 부착 기판의 물질이 척킹력에 미치는 영향이 더 크다.

3. 인가전압이 증가하면 척킹력 뿐만 아니라 척킹력이 변화율도 증가하였다.

4. 전극 간 간격이 증가하면 척킹력은 감소하고 일정 간격까지 척킹력은 급격히 감소하였으나 이후부터 척킹력 변화율이 작아졌다.

5. 전극 폭이 증가할수록 척킹력은 증가하였고 일정 폭까지 척킹력은 급격히 증가하고 그 이후부터 척킹력의 증가율은 감소하였다.

본 연구는 OLED 증착 공정용 정전척의 개발과 연구에 활용 가능성이 매우 높을 것으로 예상된다. 또한, 해석의 정밀성을 높이기 위해서 정전척에서 발생하는 열과 그로 인한 전기적, 기계적 변화를 고려한 연구가 추가로 필요로 하다.

감사의 글

이 논문은 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 진행된 연구입니다(P0008458, 산업혁신인재성장지원사업).

참고문헌

1. M. Eritt, C. May, K. Leo, M. Toerker, and C. Radehaus, "OLED manufacturing for large area lighting applications", *Thin solid films*, Vol. 518, no.11, pp. 3042-

3045, 2010.
 2. D.H. Kim, and K. S. Kim, "Study on Coolant Passage for Improving Temperature Uniformity of the Electrostatic Chuck Surface", *Journal of the semiconductor & display technology*, Vol. 15, no. 3, pp. 72-77, 2016.
 3. A. Johnsen and K. Rahbek, "A physical phenomenon and its applications to telegraphy, telephony, etc", *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, Vol. 61, no. 320, pp. 713-725, 1923.
 4. J. Guo, J. Leng and J. Rossiter, "Electroadhesion technologies for robotics: A comprehensive review", *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 36, no. 2, pp. 313-327, 2019.
 5. J. Guo, T. Bamber, M. Chamberlain, L. Justham, and M. Jackson, "Optimization and experimental verification of coplanar interdigital electroadhesives", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 49, no. 41, 2016.
 6. H. Prahlad, R. Pelrine, S. Stanford, J. Marlow, and R. Kornbluh, "Electroadhesive robots—wall climbing robots enabled by a novel, robust, and electrically controllable adhesion technology", *IEEE international conference on robotics and automation*, pp. 3028-3033, 2008.
 7. K. Choi, J. Y. Chung, I. K. Park, N. Y. Kim, J. Suhr, and J. D. Nam, "Capturing Polar and Nonpolar Particles with an Electroadhesive Device Using Interfacial and Orientational Polarization", *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, Vol. 9, no. 39, pp. 13367-13375, 2021.
 8. M. Ritter, and D. Barnhart, "Geometry characterization of electroadhesion samples for spacecraft docking application", *IEEE Aerospace Conference*, pp. 1-8, 2017.
 9. B. C. Leung, N. R. Goeser, L. A. Miller, and S. Gonzalez, "Validation of electroadhesion as a docking method for spacecraft and satellite servicing", *IEEE Aerospace Conference*, pp. 1-8, 2015.
 10. K. Yatsuzuka, J. I. Toukairin, K. Asano, and S. Aonuma, "Electrostatic chuck with a thin ceramic insulation layer for wafer holding", In *Conference Record of the 2001 IEEE Industry Applications Conference. 36th IAS Annual Meeting (Cat. No. 01CH37248)*, Vol. 1, pp. 399-40, 2001.
 11. C. H. Li, Y. F. Chiu, Y. H. Yu, and J. Z. Chen, "Simulation studies on bipolar electrostatic chucks", In *2015 10th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT)*, pp. 382-385, 2015.
 12. J. Y. Lee, K. M. Jang, D. K. Min, J. G. Kang, G. H. Sung, and H. D. Kim, "A Study on Attractive Force

- Characteristics of Glass Substrate Using Alumina Electrostatic Chuck by Finite Element Analysis", Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 19, no. 4, pp. 45-50, 2020.
13. J. Yoo, J. S. Choi, S. J. Hong, T. H. Kim, and S. J. Lee, "Finite element analysis of the attractive force on a Coulomb type electrostatic chuck", International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), pp. 1371-1375, 2007.
14. H.S. Choi, I.H. Park, and W.K. Moon, "On the physical meaning of maxwell stress tensor", The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 58, no. 4, pp. 725-734, 2009.
-
- 접수일: 2023년 7월 5일, 심사일: 2023년 8월 25일,
게재확정일: 2023년 9월 11일