

대면적 저누설 커패시터를 위한 최적화 블레이드 코팅 기반 고분자 유전체 프린팅

서경호¹ · 배진혁^{1,2*}

Printing of Polymer Dielectric via Optimal Blade Coating for Large-scale Low-Leakage Capacitors

Kyeong-Ho Seo¹ and Jin-Hyuk Bae^{1,2*}

Abstract

We demonstrated a polymer dielectric with low leakage characteristics through an optimal blade coating method for low-cost and large-scale fabrication of metal-insulator-metal (MIM) capacitors. Cross-linked poly(4-vinylphenol) (C-PVP), which is a typically used polymer dielectric, was coated on a 10×10 cm indium-tin-oxide (ITO) deposited glass substrate by changing the deposition temperature (T_D) and coating velocity (V_C) in the blade coating. During the blade coating, the thickness of the thin c-PVP varied depending on T_D and V_C owing to the 'Landau-Levich (LL) regime'. The c-PVP-dielectric-based MIM capacitor fabricated in this study showed the lowest leakage current characteristics (10^{-6} A/cm² at 1.2 MV/cm², annealing at 200 °C) and uniform electrical characteristics when T_D was 30 °C and V_C was 5 mm/s. In addition, at $T_D = 30$ °C, stable leakage characteristics were confirmed when a different electric field was applied. These results are expected to positively contribute to applications with next-generation electronic devices.

Keywords : Large-scale, Polymer dielectric, Metal-insulator-metal capacitors, Low leakage characteristics, Blade coating, Cross-linked poly(4-vinylphenol)

1. 서 론

최근, 인쇄 전자는 센서, 웨어러블 전자기기, 광전지 등 다양한 분야의 전자기기를 제조하는 데 적용되는 차세대 기술로 주목받고 있다[1,2]. 기존의 진공 공정과 비교하였을 때, 용액 공정 기반의 인쇄 전자소자 기술은 훨씬 간단하고, 빠르며, 비용 효율적인 방법으로 전자소자를 양산할 수 있는 가능성을 제공한다[3]. 현재까지, 인쇄 전자의 상용화를 위해 다양한 인쇄공정 방법이 제시되어왔다. 현재 각광받고 있는 인쇄공정 방법 중 하나인 메니스커스 유도 코팅(meniscus guided coating; MGC)은 기판과 코팅 헤드 사이의 모세관 힘에 의해 고정된 용액이 코팅 헤드의 움직임에 따라 표적 기판 위에 증착되는 원리를 이

용하는 코팅 방법이다. 이러한 방법은 용액 공정의 대표적 코팅 방법인 스핀코팅에 비하여 적은 용액량으로 대면적에 빠르게 도포를 할 수 있으며, 잉크젯 프린팅에 비해 균일한 대면적 도포가 가능하다는 장점으로 인해 산업적 활용도가 높다. 또한, 코팅 파라미터의 제어를 통해 박막의 두께 및 화학적, 물리적, 전기적 특성을 제어할 수 있다는 장점이 있다. 특히, 이방성 재료를 사용하였을 경우, 박막 내 분자 혹은 나노입자의 정렬도를 높일 수 있다는 장점 또한 가지고 있어 다양한 인쇄 전자 분야에서 활용되고 있다. 대표적인 MGC 방법은 바 코팅, 블레이드 코팅, 딥 코팅, 존 캐스팅 등이 있다[4-12].

유전체는 전기장 안에서 극성을 지녀 전기장의 전위차가 감소하게 되고, 해당 전위차만큼 에너지를 저장하는 역할을 한다. 이런 유전체는 현재 반도체 마이크로 일렉트로닉스, 박막 트랜지스터, 데이터 관독 기기와 같은 많은 응용소자에 기초를 형성한다[13,14]. 전통적인 이산화규소, 산화 알루미늄, 산화 하프늄과 같은 산화물 기반 유전체는 상대적으로 높은 경도와 저장용량 및 낮은 누설 특성을 보여 널리 응용되고 있다[15,16]. 하지만 롤러블, 웨어러블 그리고 플렉서블 전자소자가 현재 전자산업분야에 떠오르고 있는 새로운 플랫폼으로 화두되고 있음에 따라, 기존의 딱딱하고, 낮은 연신력을 보이는 산화물 소재와 달리 유연하고 신축성을 가지는 고분자 소재의 유전체가 각광받고 있다[17-19]. 수많은 고분자 소재중, 가교 결합된 폴리(4-비닐페

¹ 경북대학교 전자전기공학부(School of Electronic and Electrical Engineering, Kyungpook National University) 80 Daehakro, Bukgu, Daegu, 41566, Korea

² 경북대학교 전자공학부(School of Electrical Engineering, Kyungpook National University) 80 Daehakro, Bukgu, Daegu, 41566, Korea

*Corresponding author: jhbae@ee.knu.ac.kr

(Received: Jan. 15, 2021, Revised: Jan. 21, 2021, Accepted: Jan. 27, 2021)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

놀) (cross-linked poly(4-vinylphenol; c-PVP)은 PVP에 가교제를 첨가하여 만든 가교화 고분자로 기존의 PVP보다 매끄러운 표면과 높은 전기장 강도, 높은 유전 상수를 갖춰, 고분자 유전체 소재로 각광받고 있다[20,21]. 하지만, 유기물 기반의 유전체는 금속 산화물 혹은 실리콘 산화막에 비해 여전히 불안정한 전기적 특성을 가진다. 더 나아가, 기존의 많은 연구들에서 스핀 코팅을 통해 제작된 유기 절연체를 사용하여 박막 트랜지스터와 같은 단위 소자를 제작하였으나 산업에 실질적 활용을 위해서는 MGC를 통한 대면적 박막 형성과 이를 통해 제작된 유기 절연체의 전기적 특성의 이해가 요구된다. 특히, MGC를 통하여 박막을 형성할 시 증착 온도(Deposition Temperature; T_D) 및 코팅 속도(Coating Velocity; V_C) 등의 코팅 파라미터들은 박막의 특성에 직접적인 영향을 미치기 때문에 파라미터의 제어에 따른 박막 특성의 명확한 규명이 필요하다[22].

본 연구에서는, 대표적인 MGC 방법 중 하나인 블레이드 코팅 방법을 활용하여 c-PVP 유전체의 대면적 코팅을 시행하였고 이를 기반으로 MIM 커패시터를 제작한 후 물리적 및 전기적 특성을 평가하였다. 블레이드 코팅 시 T_D 및 V_C 를 변화시킴에 따라 유체에 작용하는 점성력이 지배적으로 영향을 주는 ‘Landau-Levich (LL) regime’에 의해 박막 두께가 달라졌고[23], 이는 제작된 소자의 전기적 성능에도 영향을 주었다.

2. 연구 방법

2.1 C-PVP 유전체 용액 준비

C-PVP는 PVP와 메틸레이티드 폴리(멜라민-코-포-말데하이드) (methylated poly(melamine-co-for- maldehyde; PMF)을 1:1.25의 질량비로 혼합하고 프로필렌 글리콜 메틸 에테르 아세테이트 (propylene glycol methyl ether acetate)에 10 wt% 농도비로 용해하여 제조되었다. 보다 용이한 용해공정을 위해 혼합물은 30 °C의 온도에서 12시간 동안 교반되었다.

2.2 C-PVP 유전체 기반 커패시터 공정

C-PVP 유전체 기반 MIM 커패시터 공정을 위해 10 cm × 10 cm 크기의 ITO 게이트 전극이 코팅된 glass가 기판으로 사용되었다. ITO glass는 순차적으로 아세톤(acetone), 이소프로필알코올(isopropyl alcohol) 그리고 초순수(de-ionized water)로 세정되었다. 잔류 용매를 제거하기 위해 기판을 질소 가스 하에서 건조시키고 150 °C의 핫 플레이트 위에 5분 동안 열처리하였다. 열처리된 기판은 UV/ozone에 30분 동안 노출되어 표면에너지가 상승되었고 잔여 유기물이 제거되었다. 기판을 blade coater 온도 각각 30 °C, 70 °C 위에 올려놓고 준비된 c-PVP 용액을 주입시킨 후, 코팅 속도를 각각 2 mm/s, 5 mm/s, 10 mm/s로 설정하여

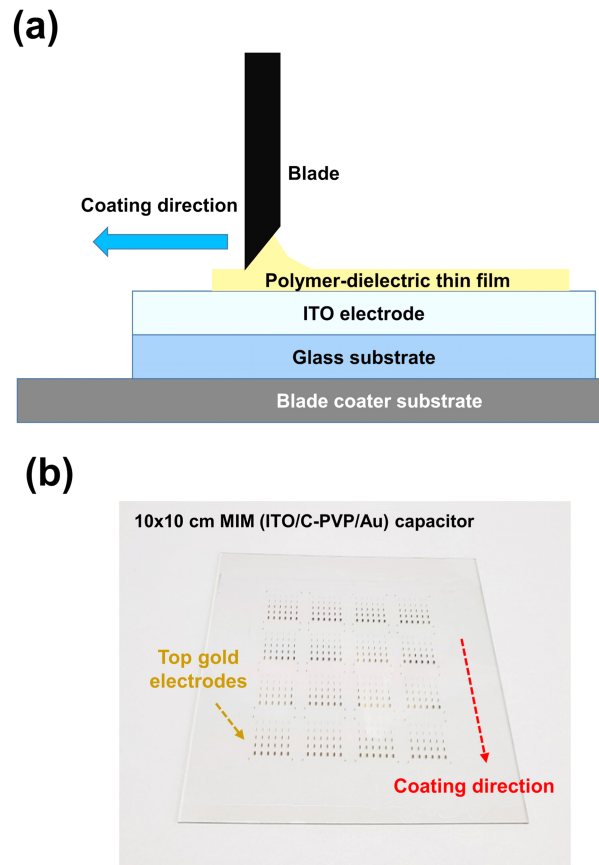


Fig. 1. (a) Schematic diagram of polymer-dielectric thin film fabrication process (b) image of the fabricated c-PVP thin film based MIM capacitor.

코팅하였다. C-PVP가 도포된 기판은 200 °C의 핫 플레이트 위에서 한 시간동안 어닐링되었다. 최종적으로 MIM 커패시터를 제작하기 위해, 금(Au) 전극이 열 증착기(thermal evaporator)를 통해 1 Å/s의 증착 속도로 c-PVP 박막 상에 증착되었고, 그때의 전극의 두께는 50 nm였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 C-PVP 유전체 기반 MIM 커패시터 전기적 특성

T_D 및 코팅 속도 V_C 가 어떻게 코팅된 유전체에 영향을 주는 지 확인하기 위해, T_D 및 V_C 의 조건 변화에 따른 c-PVP 기반 MIM 커패시터의 전기장-누설 전류 밀도 특성을 분석하였다. MIM 커패시터의 성능 평가를 위해, T_D 는 각각 30, 70 °C에서 V_C 는 각각 2, 5, 10 mm/s에서 c-PVP 도포가 진행되었다. Fig. 2(a)에서 보여지는 것처럼, $T_D = 30$ °C에서는 $V_C = 5$ mm/s로 c-PVP가 코팅되었을 때, 1.2 MV/cm² 에서 10⁻⁶ A/cm²의 가장 낮은 누설 전류가 흐른 MIM 커패시터를 제작할 수 있었다. 이는

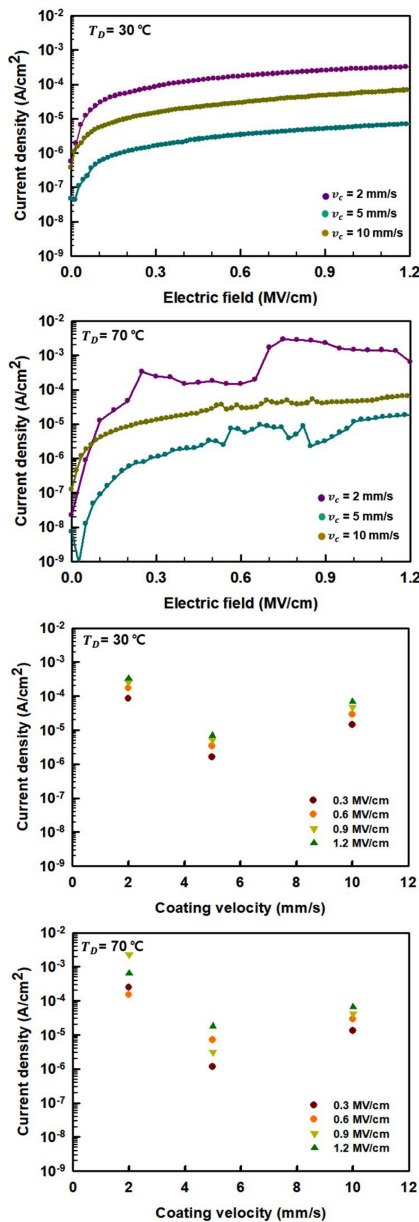


Fig. 2. J-E characteristics of fabricated c-PVP based MIM capacitor: (a) $T_D=30\text{ }^\circ\text{C}$ and (b) $T_D=70\text{ }^\circ\text{C}$. J-C characteristics of fabricated c-PVP thin film based MIM capacitor at each electric field: (c) $T_D=30\text{ }^\circ\text{C}$ and (d) $T_D=70\text{ }^\circ\text{C}$. (T_D is deposition temperature, V_C is coating velocity, J is current density, E is electric field and C is coating velocity).

$V_C=2\text{ mm/s}$ 였을 때 1.2 MV/cm^2 에서 10^{-4} A/cm^2 의 누설전류가 흐른 것 보다 약 10^3 배 더 낮은 값이다. 또한 코팅 시 V_C 는 커패시터의 성능에 영향을 주지만 V_C 와 성능은 비례하지 않았던 것도 확인되었다. 한편, Fig. 2(b)에서 보여지는 것처럼, 마찬가지로 $T_D=70\text{ }^\circ\text{C}$ 에서도 $V_C=5\text{ mm/s}$ 였을 때, 누설 전류 밀도가 가장 낮았다. 그러나 $T_D=30\text{ }^\circ\text{C}$ 일 때와 비교하면, 누설 전류 밀도가 매우 불안정했다. 이는 c-PVP 유전체는 $T_D=70\text{ }^\circ\text{C}$ 일 때 코팅 시 용액이 너무 많이 증발하여 c-PVP 박막에 물리적 변화가

일어났고 이로 인해 누설 전류가 불안정하게 흐른 것으로 사료된다. Fig. 2(c)와 (d)는 각각 $T_D=30, 70\text{ }^\circ\text{C}$ 에서 제어된 V_C 에 따른 전기장 내의 누설 전류 밀도 관계를 보여준다. $T_D=30\text{ }^\circ\text{C}$ 에서 누설 전류 밀도 분포가 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 일 때보다 더 밀집하게 분포된 것을 확인할 수 있다. 이는 $T_D=30\text{ }^\circ\text{C}$ 가 더 포화(Saturation)된 곡선을 보이는 것을 의미하고, 안정적인 누설 전류 특성의 결과를 나타낸다. 상기 실험을 통해 $T_D=30\text{ }^\circ\text{C}$, $V_C=5\text{ mm/s}$ 로 c-PVP를 코팅한 후 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 에서 어닐링하여 1.2 MV/cm^2 에서 10^{-6} A/cm^2 의 누설 전류를 갖는 커패시터를 제작할 수 있었다. 이는 $300\text{--}600\text{ }^\circ\text{C}$ 의 고온에서 어닐링을 진행한 Xia *et al.*의 high-k Al_2O_3 기반 MIM 커패시터와 비슷한 수준이며, 보다 낮은 온도에서도 이 정도의 특성을 갖출 수 있다는 것은 본 연구의 우수성을 다시 한 번 더 강조할 수 있을 것으로 사료된다[24].

3.2 블레이드 코팅 파라미터 제어에 따른 c-PVP 유전체 특성

Fig. 3은 c-PVP 유전체의 구조적 특성을 나타낸다. Fig. 3(a)는 T_D 와 V_C 변화가 c-PVP 유전체의 두께에도 영향을 주는 것을 보여준다. $T_D=30, 70\text{ }^\circ\text{C}$ 그리고 $V_C=2, 5, 10\text{ mm/s}$ 로 설정하여 박막을 도포하였을 때, V_C 가 2~10 mm/s 범위 내에서 $T_D=30\text{ }^\circ\text{C}$

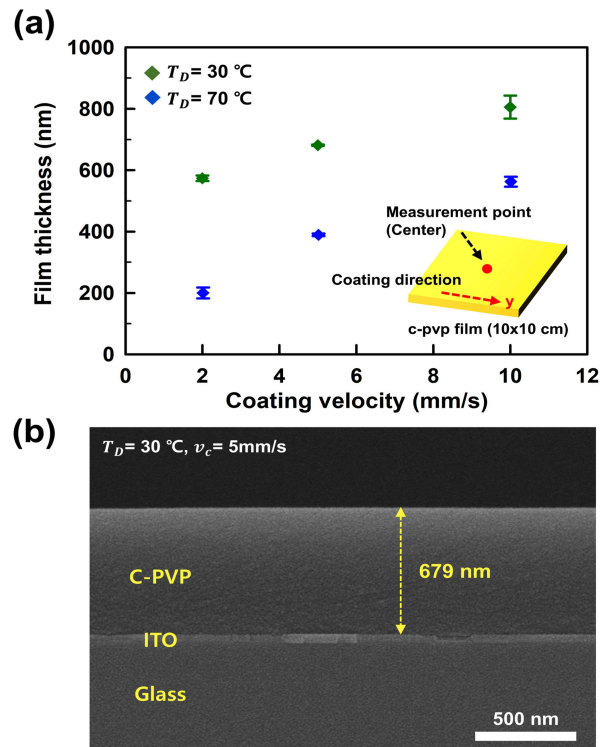


Fig. 3. (a) Comparison of c-PVP film thickness according to blade coater temperature and coating velocity. (b) FE-SEM image of the fabricated c-PVP film ($T_D=30\text{ }^\circ\text{C}$, $V_C=5\text{ mm/s}$). (T_D is deposition temperature and V_C is coating velocity).

에서 c-PVP 유전체를 코팅했을 때가 70 °C에서 코팅했을 때보다 더 얇은 두께의 박막이 형성되었다. 또한 V_c 를 더 높게 설정함에 따라 더 두꺼운 박막이 형성되었다. 이는 Fig. 2에서 코팅 속도에 따라 누설 전류가 비례적으로 증가하거나 감소하지 않았던 것과 달리, V_c 는 박막 형성에 규칙적인 영향을 준다는 것을 의미한다. 구체적으로, 이러한 현상은 형성된 c-PVP 유전체에서 유체 역학적 현상 중 하나인 ‘Landau–Levich (LL) regime’가 나타난 것이다. ‘LL regime’은 블레이드와 코터 기관 사이의 용액이 점성력에 의해 코팅 시 끌리게 되고, 뒤이어 용액이 증발되는 원리이다. 이 원리로 인해 속도가 빨라질수록, 메니스커스로부터 액체 필름이 끌리는 힘은 강해지고, 이는 박막 두께에도 영향을 주게 된다. ‘LL regime’에서는 코터 기관에 의해 끌린 용매의 양이 증발된 용매의 양보다 더욱 지배적이게 되고, 이는 더 두꺼운 박막을 형성하게 한다[25,26]. Fig. 3(b)는 형성된 유전막의 특성이 가장 좋게 나왔던 c-PVP의 단면도를 FE-SEM 촬영으로 획득한 사진이고, 그때의 두께는 679 nm였다.

3.3 C-PVP 유전체 기반 MIM 커패시터 균일성

제작된 c-PVP 유전체를 기반으로 한 MIM 커패시터의 누설 특성을 줄인 한편, 대면적 공정된 MIM 커패시터의 전기적 특성의 전기적 균일성을 추가적으로 평가하였다. 본 실험에서는 10×10 cm 크기의 기관에 제작된 16개의 MIM 커패시터의 누설 특성과 정전용량을 분석하였다. 균일성 평가는 성능이 가장 좋았던 $T_D = 30$ °C, $V_c = 5$ mm/s의 코팅조건으로 도포된 박막을 대상으로 진행하였고, MIM 커패시터를 제작한 후, 각 면적에 따른 누설 전류 밀도와 정전용량을 측정 후 비교 분석하였다.

Fig. 4(a)에서 볼 수 있듯이, 0.5 MV/cm, 1 MV/cm의 전기장을 가했을 때, 제작된 소자는 대략 10^{-6} A/cm²로 균일하게 전류 특성을 나타냈었다. 또한 정전용량값을 보면 측정된 영역의 정전용량은 약 7 ± 1.5 nF/cm² 정도로 대면적의 용액 공정으로 제작 되었음을 고려하였을 때, 상당히 균일한 정전용량을 보였다. 이는 앞선 블레이드 코팅 조건에 따라 도포된 c-PVP가 고르게 박막을 형성되어 면적에 따른 전기적 특성 또한 고르게 나타났

는 것을 보여준다.

4. 결 론

본 연구에서는 blade coating 방법을 통해 대면 프린팅 된 c-PVP 유전체 기반 MIM 커패시터를 제작하였고, 코팅 시 T_D 및 V_c 에 따른 소자의 전기적, 물리적 특성을 분석하였다. 코팅 시 ‘LL regime’에 의해 T_D 및 V_c 에 따라 c-PVP 유전체의 구조적 특성이 달라졌고, 이는 전기적 특성에도 영향을 주었다. $T_D = 30$ °C가 70 °C와 달리 전반적으로 MIM 커패시터에서 안정적인 누설 특성을 보였다. 70 °C에서는 증발속도가 빠르게 일어나 코팅된 박막에 구조적으로도 영향을 주어 누설 전류의 안정성에도 치명적으로 작용했던 것으로 간주된다. V_c 가 5 mm/s였을 때, 1.2 MV/cm의 전기장에서 누설 전류가 약 10^{-6} A/cm²였었고, 2 mm/s와 비교하였을 때 약 10^2 배 더 낮았다. 추가적으로, 최적화된 성능을 보유한 c-PVP 유전체 기반 커패시터는 각 면적에서 누설 특성 및 정전용량 특성이 균일하게 나타났다. 이러한 결과는 플렉서블 전자소자를 비롯한 차세대 전자소자 응용에도 긍정적인 기여를 할 것으로 기대된다.

감사의 글

This research was supported by the Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science and ICT (2018R1A2B6008815).

REFERENCES

- [1] C. Sekine, Y. Tsubata, T. Yamada, M. Kitano and S. Doi, “Recent Process of high performance polymer OLED and OPV materials for organic printed electronics”, *Sci. Technol. Adv. Mater.*, Vol. 15, No. 3, pp. 034203(1)-034203(15), 2014.
- [2] Y. Khan, A. Thielens, S. Muin, J. Ting, C. Baumbauer and A. C. Arias, “A New Frontier of Printed Electronics: Flexible Hybrid Electronics”, *Adv. Mater.*, Vol. 32, No. 15 pp. 1905279(1)-1905279(29), 2020.
- [3] W. Wu, “Inorganic nanomaterials for printed electronics: a review”, *Nanoscale*, Vol. 9, No.22, pp. 7342-7372, 2017.
- [4] M. Richard, A. Al-Ajaji, S. Ren, A. Foti, J. Tran, M. Frigoli, B. Gusarov, Y. Bonnassieux, E. G. Caurel, P. Bulkin, R. Ossikovski, A. Yassar, “Large-scale patterning of π -conjugated materials by meniscus guided coating methods”, *Adv. Colloid Interface Sci.*, Vol. 275, pp. 102080(1)-102080(25), 2020.
- [5] R. Janneck, D. Karaginnis, P. Heremans, J. Genoe and C.

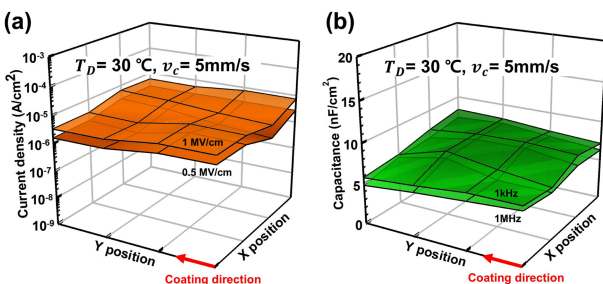


Fig. 4. Characteristics distribution depending on the position of c-PVP based MIM capacitor: (a) leakage current density and (b) capacitance. (T_D is deposition temperature and V_c is coating velocity).

- Rolin, "Influence of Solute Concentration on Meniscus-Guided Coating of Highly Crystalline Organic Thin Films", *Adv. Mater. Interfaces*, Vol. 6, No. 19, pp. 1900614(1)-190614(11), 2019.
- [6] X. Gu, L. Shaw, K. Gu, M. F. Toney and Z. Bao, "The meniscus-guided deposition of semiconducting polymers", *Nat. Commun.*, Vol. 9, No. 1, pp. 534(1)-534(16), 2018.
- [7] D. Khim, H. Han, K.-J. Baeg, J. Kim, S.-W. Kwak, D.-Y. Kim, Y.-Y. Noh, "Simple Bar-Coating Process for Large-Area, High Performance Organic Field-Effect Transistors and Ambipolar Complementary Integrated Circuits", *Adv. Mater.*, Vol. 25, No. 31, pp. 4302-4308, 2013.
- [8] Y.-H. Chang, S.-R. Tseng, C.-Y. Chen, H.-F. Meng, E.-C. Chen, S.-F. Horng, and C.-S. Hsu, "Polymer solar cell by blade coating", *Org. Electron.*, Vol. 10, No. 5, pp. 741-746, 2009.
- [9] Y. Lu, R. Ganguli, C. A. Drewien, M. T. Anderson, C. J. Brinker, W. Gong, Y. Guo, H. Soyez, B. Dunn, M. H. Huang and J. I. Zink "Continuous formation of supported cubic and hexagonal mesoporous films by sol-gel dip coating", *Nature*, Vol. 389, No. 6649, pp. 364-386, 1997.
- [10] S.-R. Tseng, H.-F. Meng, K.-C. Lee and S.-F. Horng, "Multilayer polymer light-emitting diodes by blade coating method", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 93, No. 15, pp. 153308(1)-153308(3), 2008.
- [11] A. Pierre, M. Sadeghi, M. M. Payne, A. Facchetti, J. E. Anthony and A. C. Arias, "All-Printed Flexible Organic Transistors Enabled by Surface Tension-Guided Blade Coating", *Adv. Mater.*, Vol. 26, No. 32, pp. 5722-5727, 2014.
- [12] S. Chu, W. Chen, Z. Fang, X. Xiao, Y. Liu, J. Chen, J. g Huang and Z. Xiao, "Large-area and efficient perovskite light-emitting diodes via low temperature blade coating", *Nat. Commun.*, Vol. 12, No. 1, pp. 147(1)-147(9), 2021.
- [13] M. Hollerer, D. Lüttner, P. Hurdax, T. Ules, S. Soubatch, F. S. Tautz, G. Koller, P. Puschnig, M. Sterrer and M. G. Ramsey, "Charge Transfer and Orbital Level Alignment at Inorganic/Organic Interfaces: The Role of Dielectric Interlayers", *ACS Nano*, Vol. 11, No. 6, pp. 6252-6260, 2017.
- [14] A. Liu, G. Liu, H. Zhu, B. Shin, E. Fortunato, R. Martins and F. Shan, "Eco-Friendly water induced-aluminum oxide dielectrics and their application in a hybrid metal oxide/polymer TFT", *RSC Advances*, Vol. 5, No. 105, pp. 86606-86613, 2015.
- [15] K. K. Banger, Y. Yamashita, K. Mori, R. L. Peterson, T. Leedham, J. Rickard and H. Sirringhaus, "Low-temperature, high performance solution-processed metal oxide thin-film transistors formed by a 'sol-gel on chip' process", *Nature Mater.*, Vol. 10, No. 1, pp. 45-50, 2011.
- [16] A. Liu, H. Zhu, H. Sun, Y. Xu and Y.-Y. Noh, "Solution Processed Metal Oxide High-k Dielectrics for Emerging Transistors and Circuits", *Adv. Mater.*, Vol. 30, No. 33, pp. 1706364(1)-1706364(39), 2018.
- [17] B. Nketia-Yawson, Y.-Y. Noh, "Recent Progress on High-Capacitance Polymer Gate Dielectrics for Flexible Low-Voltage Transistors", *Adv. Mater.*, Vol. 28, No. 42, pp. 1802201(1)-1802201(27), 2018.
- [18] A. Azizi, M. R. Gadinski, Q. Li, M. A. AlSaud, J. Wang, Y. Wang, B. Wang, F. Liu, L. Q. Chen, N. Alem and Q. Wang, "High-Performance Polymers Sandwiched with Chemical Vapor Deposited Hexagonal Boron Nitrides as Scalable High-Temperature Dielectric Materials", *Adv. Mater.*, Vol. 29, No. 35, pp. 1701864(1)-1701864(7), 2017.
- [19] Y. Zhou and Q. Wang, "Advanced polymer dielectrics for high temperature capacitive energy storage", *J. Appl. Phys.*, Vol. 127, No. 24, pp. 240902(1)-240902(18), 2020.
- [20] M.-H. Lim, W.-S. Jung, J.-H. Park, "Curing temperature- and concentration-dependent dielectric properties of cross-linked poly-4-vinylphenol (PVP)", *Curr. Appl. Phys.*, Vol. 13, No. 8, pp. 1554-1557, 2013.
- [21] J.-H. Kwon, J.-H. Choi, H. Lee, J.-H. Bae and J. Park, "Structural modification of poly(4-vinylphenol) insulators in pentacene transistors by using dimethyl ketone", *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, Vol. 704, No. 1, pp. 145-152, 2020.
- [22] D.-K. Kim, P. Vincent, J. Jang, I. M. Kang, H. Kim, P. Lang, M. Choi and J.-H. Bae, "Contact line curvature-induced molecular misorientation of a surface energy patterned organic semiconductor in meniscus-guided coating", *Appl. Surf. Sci.*, Vol. 504, pp. 144362(1)-144362(6), 2020.
- [23] J. Chang, C. Chi, J. Zhang and J. Wu, "Controlled Growth of Large-Area High-Performance Small-Molecule Organic Single-Crystalline Transistors by Slot-Die Coating Using A Mixed Solvent System", *Adv. Mater.*, Vol. 25, No. 44, pp. 6442-6447, 2013.
- [24] W. Xia, G. Xia, G. Tu, X. Dong, S. Wang and R. Liu, "Sol-gel processed high-k aluminum oxide dielectric films for fully solution-processed low voltage thin-film transistor", *Ceram. Int.*, Vol. 44, No. 8, pp. 9125-9131, 2018.
- [25] F. Doumenc and B. Guerrier, "Drying of a Solution in a Meniscus: A Model Coupling the Liquid and the Gas Phase", *Langmuir*, Vol. 26, No. 17, pp. 13959-13967, 2010.
- [26] M. L. Berre, Y. Chen and D. Baigl, "From Convective Assembly to Landau-Levich Deposition of Multilayered Phospholipid Films of Controlled Thickness", *Langmuir*, Vol. 25, No. 5, pp. 2554-2557, 2009.