

Flexible AM-OLED를 위한 OTFT 기술 기반의 MIS 구조 C-V 특성 분석

김중석, 김병민, 장종현, 주병권, 박정호
고려대학교 전기공학과

Analysis of C-V Characteristics of MIS Structure Based on OTFT Technology for Flexible AM-OLED

Jung Seok Kim, Byoung-min Kim, Jong-hyeon Chang, Byeong-Kwon Ju, Jungho Pak
Department of Electrical Engineering, Korea University.

Abstract - 최근 flexible OLED의 구동에 사용하기 위한 유기박막트랜지스터(Organic Thin Film Transistor, OTFT)의 연구에서는 용매에 용해되어 spin coating이 가능한 재료의 개발에 관심을 두고 있다. 현재 pentacene으로는 아직 spin coating으로 제작할 수 있는 상용화된 제품이 없고 spin coating이 가능한 활성층 물질(active material)로 P3HT가 쓰이고 있다. 본 연구에서는 용해 가능한 P3HT 활성층 물질과 여러 종류의 용해 가능한 게이트 절연체(gate insulator, GI)를 사용하여 안정된 소자를 구현할 수 있는 공정을 개발하는 목적으로 metal-insulator-semiconductor(MIS) 소자를 제작하여 C-V 특성을 측정하고 분석하였다. 먼저 7mm×7mm 크기의 pyrex glass 시편 위에 바닥 전극으로 1600Å Au를 증착하고 spin coating 방식을 이용하여 PVP, PVA, PVK, BCB, PI의 5종류의 게이트 절연층을 각각 형성하였고 그 위에 같은 방법으로 P3HT를 코팅하였다. P3HT 코팅 시 bake 공정의 유무와 spin rpm의 변화에 따른 P3HT의 두께를 측정하였다. GI의 종류별로 주파수에 따른 capacitance를 측정하여 비교, 분석하였다. C-V 측정 결과 PVP, PVA, PVK, BCB, PI의 단위 면적당 capacitance 값은 각각 1.06, 2.73, 2.94, 3.43, 2.78nF/cm²로 측정되었다. Threshold voltage, V_{th}는 각각 -0.4, -0.7, -1.6, -0.1, -0.2V를 나타냈다. 주파수에 따른 capacitance 변화율을 측정 한 결과 GI 물질 모두 주파수가 높을수록 capacitance가 점점 감소하는 경향을 보였으나 1²nF 이내의 범위에서 작은 변화율만 나타났다. P3HT의 두께와 bake 온도를 변화시켜 C-V 값을 측정 한 결과 큰 차이는 없었다. FE-SEM으로 관찰한 결과에서도 두께나 온도에 따른 P3HT의 표면 morphology 차이를 확인할 수 없었다. 본 연구에서 PVK와 P3HT의 조합이 수율(yield)면에서 가장 안정적이면서 3.43 nF/cm²의 가장 높은 capacitance 값을 나타내고 V_{th} 값 또한 -1.6V로 가장 낮은 값을 보였다.

1. 서 론

지금까지의 TFT 제작 기술은 Si 기반의 무기물이 사용되었지만 최근 연구는 금속산화물이나 플라스틱 상에서 GI와 활성층 모두 저온 공정이 가능한 유기물을 사용하여 유연한 디스플레이를 구현하기 위한 연구를 진행하고 있다. Si 기반의 TFT에서 무기물을 진공 증착하는 방식과 달리 유기박막트랜지스터(OTFT)는 soluble 공정이 가능한 GI나 활성층을 사용하기 때문에 공정 외적 요인이 크게 작용한다. 때문에 OTFT는 Si 기반의 TFT에 비해 구동 성능에서 떨어지는 경향이 있다. 이를 위해 많은 종류의 GI 물질과 활성 물질이 개발되고 있는데 특히, GI 물질은 TFT에서 가장 중요한 스위칭 역할을 하는 구조층으로 많은 연구가 진행 중이며 그 가치를 높게 평가받고 있다.

본 연구를 위해 soluble 공정이 가능한 GI로 각 poly(4-vinylphenol)(PVP), poly(vinyl alcohol)(PVA), poly(9-vinylcarbazole)(PVK), benzocyclobutene(BCB), polyimide(PI)를 사용하였고, 활성층은 이동도가 0.1cm²V⁻¹s⁻¹로 비교적 높은 p-type의 poly(3-hexylthiophene)(P3HT)를 사용하였다[1]. 위의 PVP, PVA, PVK, BCB, PI의 각 GI물질과 P3HT 활성층 물질을 사용하여 MIS 구조를 제작한 후 전기적, 물리적 특성을 비교, 분석하였다. 각각의 GI 물질과 P3HT 물질 간의 조합을 통하여 OTFT 소자로서 사용하기 적합한 물질을 찾고자 하였다.

2. 본 론

2.1 실험 방법

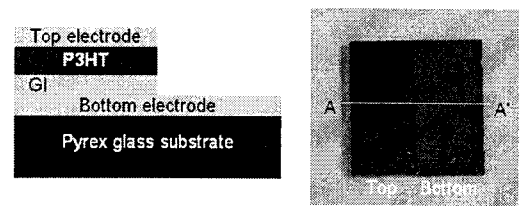
7mm×7mm 크기의 Pyrex glass 시편 위에 MIS 구조 제작을 위해 표 1의 조건으로 PVP, PVA, PVK, BCB, PI, 5가지 종류의 GI와 P3HT를 제작하였다. 바닥 전극을 형성하기 위해 1600Å Au를 증착한 후 tape blocking 방식으로 한쪽 면을 막아 spin coating 시 GI와 P3HT 활성층으로부터 보호하고 최종적으로 tape를 떼어냄으로써 C-V 측정시 바닥 전극의 pad 역할을 할 수 있게 하였다. GI 층은 표 2의 조건으로 PVP, PVA, PVK, BCB, PI를 각각 spin coating하고 bake하였다. 활성층 또한 같은 spin coating 방법으로 코팅하였는데 spin speed와 bake의 온도 조건을 각각 달리 하여 C-V 특성을 분석하고자 하였다. P3HT spin speed 변화는 2000, 2500, 3000, 3500rpm 조건으로 실험하였고, 온도는 bake하지 않은 시편과 100℃ hot plate에서 5분간 bake한 시편으로 각각 분류하여 진행하였다. GI와 활성층 형성 후 상부 전극으로 다시 900Å Au를 증착하여 그림 1과 같이 MIS 구조를 완성하였다.

<표 1> 게이트 절연체와 활성 물질의 혼합 및 조성표

Insulator	Chemical structure	Solvent	Mixture ratio	Weight percent(wt. %)
PVP Poly(4-vinylphenol) powder		PGMEA	3:20	13-15
PVA Poly(vinyl alcohol) powder		Cold D.I water	1:20	5
PVK Poly(9-vinylcarbazole) powder		Dioxane, Toluene, Tetrahydrofuran	1:10	10
BCB Benzocyclobutene liquid		-	-	-
PI Polyimide liquid		-	-	-
Active	Chemical structure	Solvent	Mixture ratio	Weight percent(wt. %)
P3HT Poly(3-hexylthiophene)		Toluene	1 : 10	10

<표 2> 게이트 절연체의 spin speed와 bake 조건표

Insulator	Spin coating condition		Soft bake		Thickness(Å)
	Speed(rpm)	Time(s)	emp.(°C)	Time(min)	
PVP	3000	30	200, oven	120	4000
PVA	3000	30	100, hot plate	60	3000
PVK	3000	30	120, oven	90	1200
BCB	3000	40	80, hot plate	1	2600
PI	5000	60	105, hot plate	1.5	20000



<그림 1> MIS 구조 단면 모식도와 실제 제작한 소자 사진

2.2 실험 결과

2.2.1 C-V 측정 결과

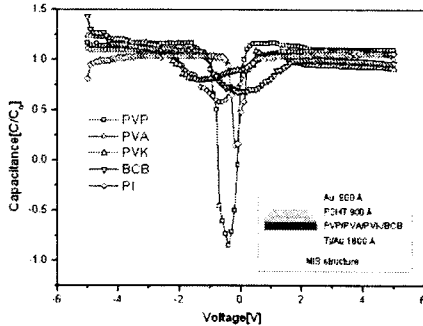
Capacitancemeter(HP4280A)를 사용하여 제작한 MIS 구조의 C-V 특성을 얻을 수 있었다. 그림 1에서 보는 바와 같이 바닥 전극을 GND로 하고 상층 전극에 +5V에서 -5V로 방향으로 0.1V씩 감소시키면서 C-V 특성을 측정하였다. 측정 결과 PVP, PVA, PVK, BCB, PI의 단위 면적당 capacitance 값은 1.06, 2.73, 2.94, 3.43, 2.78 nF/cm²로 측정되었다. 그림 2와 같이 각 게이트 절연체 모두 측정 시 100kHz의 영역에서 저주파 C-V 그래프 특성을 보였다. 이는 Si 기반의 MOS capacitor와 마찬가지로 전압을 인가함으로써 hole이 절연체의 성질에 의해 주도되어 저주파수 특성 그래프 모형을 나타냄을 의미한다. 실제로 MOS capacitor나 MOSFET의 전기적인 등가회로를 보면, 평판 MOS 구조에 사용한 capacitance는 전압 의존 게이트 절연체에 관한 식으로 정확히 정의할 수 있다[2].

$$C_{GI} = \frac{dQ}{dV} = \frac{dQ_{GI}}{d\Phi_{GI}} \quad (\text{식 1})$$

또한 각 GI의 유전 상수(k)를 식 2로부터 구할 수 있다[3].

$$k = \frac{C_{GI}t}{A\epsilon_0} \quad (식 2)$$

여기서, C_{GI} 는 GI의 capacitance이고, t 는 GI의 두께, A 는 capacitor의 면적 (0.245cm^2), ϵ_0 는 진공에서의 유전율($8.85 \times 10^{-14}\text{Fcm}^{-1}$)을 나타낸다. Threshold voltage, V_{th} 는 각각 -0.4, -0.7, -1.6, -0.1, -0.2V 값을 나타냈다. 관련 유도식에 의해 각 GI의 C-V 특성에서 얻을 수 있는 값들을 정리하면 표 3과 같다. P3HT 코팅 시 rpm에 의한 두께와 bake 조건별로 소자를 제작하였는데, 그림 3a의 결과에서 볼 수 있듯이 90~100nm 정도의 두께차가 발생하였지만 실제 C-V 값을 측정했을 때 두께 또는 bake 온도에 따른 전기적 특성 차이는 나타나지 않았다.



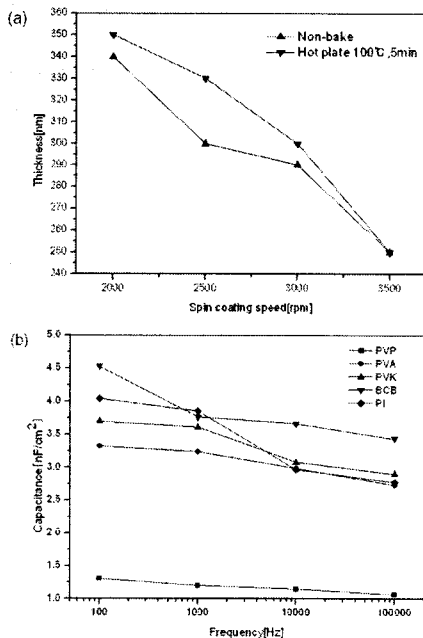
<그림 2> 정규화된 C-V 특성 곡선

<표 3> MIS 소자에서의 GI에 따른 전기적 파라미터 값

Gate Insulator	Thickness (Å)	Dielectric constant(k)	Capacitance (nF/cm ²)	Threshold voltage(V)
PVP	4000	1.9	1.06	-0.4
PVA	3000	5.0	2.73	-0.7
PVK	1200	5.4	2.94	-1.6
BCB	2600	6.3	3.43	-0.1
PI	20000	5.1	2.78	-0.2

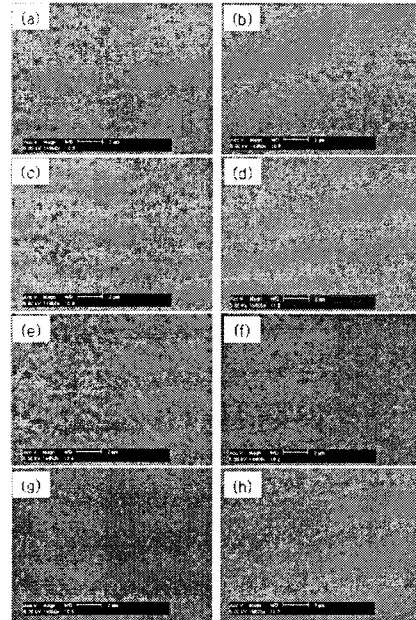
2.2.2 C-F 측정 결과

각 GI 상에 P3HT 물질 코팅 시 두께와 온도를 변화시켜 주파수에 따른 capacitance 변화율을 측정하였다. Impedance analyzer(HP4194A)를 이용하여 10mV의 oscillating voltage 조건에서 주파수에 따른 capacitance(100Hz, 1kHz, 10kHz, 100kHz)를 측정한 결과를 그림 3b에 나타냈다. 100Hz~100kHz 저주파수 영역에서는 각 GI 물질 모두 주파수가 높을수록 capacitance가 감소하는 경향을 보였으나 1.0~1.5nF/cm² 범위 이내에서 큰 변화를 나타내지 않았다[4]. FE-SEM(Philips XL30)으로 관찰한 결과에서도 두께나 온도에 따른



<그림 3> (a) Spin coating speed와 bake 유무에 따른 P3HT의 두께 변화 (b) 주파수에 따른 capacitance 변화

P3HT의 표면 morphology 차이를 뚜렷하게 확인할 수 없었다. 다만 그림 4의 (a)와 (e), (b)와 (f), (c)와 (g), (d)와 (h)로부터 2000, 2500, 3000, 3500rpm의 같은 spin speed 상태에서는 일정한 무늬를 띠고 있음을 확인하였다.



<그림 4> P3HT 두께와 온도 유무에 따른 SEM 사진 (a)~(d): 2000, 2500, 3000, 3500rpm에서 spin coating 후 non-bake 시 P3HT 표면 확대 사진, (e)~(h): 같은 조건에서 spin coating 후 100°C, 5분 bake 후 표면 확대 사진

3. 결 론

본 연구에서는 PVP, PVA, PVK, BCB, PI, 5가지의 절연체와 P3HT 활성 물질을 이용하여 제작이 용이하면서 OTFT 사용에 적합한 물질을 찾고자 하였다. 제작한 소자의 C-V 특성을 통해 capacitance, threshold voltage, dielectric constant 값을 얻은 결과 OTFT의 구동 특성 측면에서 PVK와 P3HT를 사용했을 때 가장 좋은 특성을 보였고 그 값들은 각각 2.94nF/cm^2 , -1.6V , 5.4의 결과를 보였다. 수율(yield)면에서도 PVK 절연체를 사용하여 MIS 소자를 제작하였을 때 가장 안정적인 특성을 나타냈다. 하지만 지금까지 보고된 논문에서는 PVP, PVA가 좋은 특성을 얻을 수 있다고 알려져 있다. PVP, PVA의 유전 상수가 5.0, 6.9, V_{th} 가 -2.8 , -7.6V 특성을 각각 나타낸다고 하는데, 본 결과에서 PVP는 유전 상수 1.9, V_{th} 1.06V로 가장 작은 capacitance 값의 결과를 얻었다[5, 6]. 따라서 앞으로 C-V 특성뿐만 아니라 source, drain 전극 형성 후 I-V 특성을 측정하여 mobility, subthreshold swing 값을 얻어 비교하는 것이 필요하다. 또한 실험에서 제작한 MIS 구조에 사용된 각 GI 표면 상태를 같이 분석하고 P3HT 활성층과 접촉면, trap density에 관한 연구를 추가로 진행하면 OTFT 성능면에서 최적의 조건을 찾을 것으로 생각한다.

[참 고 문 헌]

- [1] H. Klauk, *Organic Electronics, Materials, Manufacturing and Applications*, WILEY-VCH, 2006.
- [2] R. F. Pierret, *Semiconductor device Fundamentals*, Addison-Wesley Publishing Company, 1996.
- [3] Y. D. Park et al., "Low-Voltage Polymer Thin-Film Transistors with a Self-Assembled Monolayer as the Gate Dielectric," *Applied Physics Letters*, Vol. 87, No. 243509, pp. 1-3, 2005.
- [4] S. S. Park et al., "A Study of the $\text{SrBi}_2\text{Nb}_2\text{O}_9$ Capacitor on Flexible Polymer Substrate," *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 46, No. 1, pp. 277-280, 2005.
- [5] Y. Jang et al., "Influence of the Dielectric Constant of a Polyvinyl Phenol Insulator on the Field-Effect Mobility of a Pentacene-Based Thin-Film Transistor," *Applied Physics Letters*, Vol. 87, No. 152105, pp. 1-3, 2005.
- [6] S. H. Jin et al., "Pentacene OTFTs with PVA Gate Insulators on a Flexible Substrate," *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 44, No. 1, pp. 181-184, 2004.