

스퍼터링 Mo 도핑 탄소박막의 특성과 유기박막트랜지스터의 게이트 전극으로 응용

김영곤, 박용섭^a

조선이공대학교 전자과

Characteristics of Sputtering Mo Doped Carbon Films and the Application as the Gate Electrode in Organic Thin Film Transistor

Young Gon Kim and Yong Seob Park^a

Department of Electronics, Chosun College of Science and Technology, Gwangju 61453, Korea

(Received November 14, 2016; Revised November 22, 2016; Accepted November 23, 2016)

Abstract: Mo doped carbon (C:Mo) thin films were fabricated with various Mo target power densities by unbalanced magnetron sputtering (UBM). The effects of target power density on the surface, structural, and electrical properties of C:Mo films were investigated. UBM sputtered C:Mo thin films exhibited smooth and uniform surfaces. However, the rms surface roughness of C:Mo films were increased with the increase of target power density. Also, the resistivity value of C:Mo film as electrical properties was decreased with the increase of target power density. From the performance of organic thin film transistor using conductive C:Mo gate electrode, the carrier mobility, threshold voltage, and on/off ratio of drain current (I_{on}/I_{off}) showed $0.16 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, -6.0 V , and 7.7×10^4 , respectively.

Keywords: Mo doped carbon film, Unbalanced magnetron sputtering, Resistivity, Rms surface roughness, Organic thin films transistor

1. 서론

유기 박막 트랜지스터(organic thin film transistor, OTFT)는 스퍼터링, 프린팅 등의 공정을 사용하기 때문에 저가격, 저온공정, 대면적화가 가능하며, 유기물의 유연성을 바탕으로 구부러질 수 있는 장점을 가진다 [1-5]. 이러한 특성은 OTFT 소자가 두루마리 디스플레이, 전자책 등 플렉서블한 전자제품에 응용되어지고 있다. 그러나 OTFT는 유기반도체의 고유 특성 때문에

전하의 이동도가 낮으며, 산소와의 빠른 산화반응으로 봉지나 패키지 공정이 필수이며, 펜타센을 제외한 유기물들은 비정질 실리콘 물질을 이용한 TFT 소자에 비해 성능이 월등히 떨어진다. OTFT의 성능 개선 방향으로 고전도성 유기소재 개발 및 유기소재와의 적층 기술 개발과 유기물의 전도 메커니즘을 규명해야 하며, 유기물과 연계되어지는 전극 소재의 선택 등이 필수 진행되어야 한다 [6-8]. 기존 게이트 전극의 경우 배선의 RC delay를 최소화하기 위한 저저항 알루미늄, 구리 등이 주로 이용되었으나, 화학적 내성이 약하고 고온 공정시 배선 결함에 의해 주로 합금, 다층의 적층 구조로 게이트 전극을 선택하고 있다. 본 논문에서는 OTFT의 성능 향상 중 게이트 전극의 변화를 선택하였으며, 화학적 내성과 열에 강하며, 저저항을 지니는 탄

a. Corresponding author; yongspark@cst.ac.kr

소박막 전극을 게이트 전극으로 제안을 하였으며, 특히, 탄소전극은 유기물이 지나는 유사한 성분인 탄소로 이루어져 층간 접착력이 향상도 기대할 수 있을 것이라 판단된다. 또한, 금속이 도핑된 탄소 박막은 화학적 안정성, 우수한 물리적 특성, 다양한 전기적 특성 등으로 확산 방지층(diffusion barrier), 태양전지의 접촉층(contact layer)과 field-effect transistor의 게이트 전극(gate electrode) 등 다양한 반도체 소자 기술에 응용되어지고 있다 [9-11]. 본 연구에서는 비대칭 마그네트론 방법을 이용하여 몰리브덴(Mo)이 도핑된 탄소 박막들을 제작하였고, Mo 타겟 전력 밀도에 따라 제작되어진 박막의 표면, 구조, 전기적 특성들을 고찰하였으며, Mo 도핑 탄소 박막을 OTFT의 게이트 전극으로 사용하여 제작한 소자의 전기적 특성을 고찰하였다.

2. 실험 방법

몰리브덴(Mo) 도핑 탄소박막(C:Mo)은 4인치인 Mo와 흑연(graphite) 타겟을 부착한 비대칭 마그네트론 스퍼터링(unbalanced magnetron sputtering) 장치를 사용하여 제작하였다. $3 \times 3 \text{ cm}^2$ 크기의 실리콘 기판을 사용하였고, 증착전 챔버의 초기진공도는 5×10^{-6} Torr로 유지하고, 스퍼터링을 위해 99.99%의 아르곤(Ar)을 가스를 주입하여 증착 압력을 2×10^{-3} Torr의 증착압력을 유지하였다. 타겟과 기판사이의 거리는 60 mm로 유지하고 흑연 타겟의 전력밀도는 25 W/cm^2 로 고정하였고, Mo 타겟의 전력밀도를 $2 \sim 5 \text{ W/cm}^2$ 로 변화시켜 Mo 도핑 탄소박막을 제작하였다. 기판의 부착된 지그는 20 rpm으로 유지하였고, 박막의 두께는 120 nm로 제작하였다. 제작되어진 박막의 구조적, 전기적, 표면 특성들은 FESEM (field emission scanning electron microscope : XL-40aFEG), AFM (atomic force microscope: NITECH, SPM 400), X-ray photoelectron spectroscopy [XPS-PHI5200] (Al K α radiation source in an ultra high vacuum), 4-point probe로 측정하여 값을 도출하였다. 박막 특성 고찰 후 최적 조건의 박막 특성을 지닌 Mo 도핑 탄소박막을 유기박막 트랜지스터(organic thin film transistor, OTFT)의 게이트 전극으로 응용하였다. 유리기판 위에 Mo 도핑 탄소 게이트 전극을 증착 후 200 nm의 PVP 절연층을 스프인 코팅장치를 이용하여 증착하였다. 절연층 위에 80 nm의 펜타센 활성층은 thermal evaporator를 이용하여

제작하였으며, 그 위에 금(Au) 소스/드레인 전극(channel length/width: $35 \mu\text{m}/800 \mu\text{m}$)을 thermal evaporator를 이용하여 증착하여 OTFT를 완성하였고, 제작되어진 OTFT의 전기적 특성을 HP4145B semiconductor parameter analyzer를 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 타겟 전력 밀도에 따라 제작되어진 C:Mo 박막의 FESEM 표면과 단면을 나타낸다. C:Mo 박막의 표면에서 확인되어지듯이, 박막의 표면은 어떠한 결함 없이 균일하고 부드러운 것을 확인할 수 있다. 또한 FESEM 단면에서는 수직 방향으로 박막이 증착되었음을 확인할 수 있는데, 결정성이 없이 탄소박막이 증착되어지는 동안 Mo 금속이 나노크기의 결정 seed 역할을 했을 것이라고 판단되어진다.

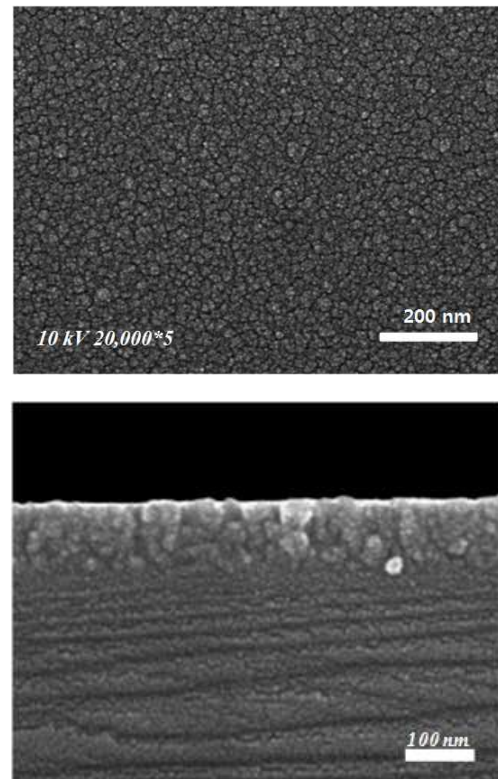


Fig. 1. FESEM surface and cross-sectional images of C:Mo thin films fabricated at the conditions of 40 W/cm^2 target power density.

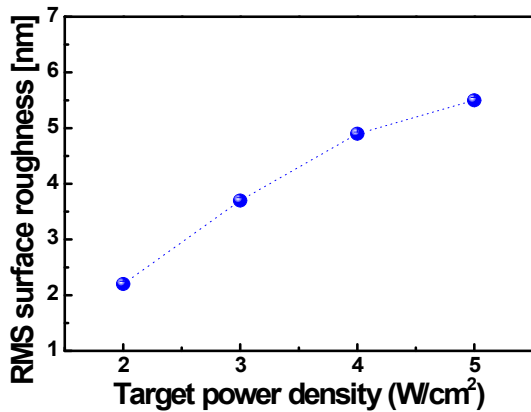


Fig. 2. Rms surface roughness values of C:Mo thin films fabricated with the increase of Mo target power density.

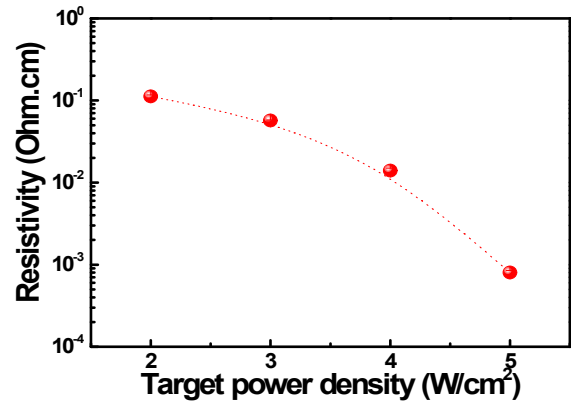


Fig. 4. Resistivity of C:Mo thin films fabricated with the increase of Mo target power density.

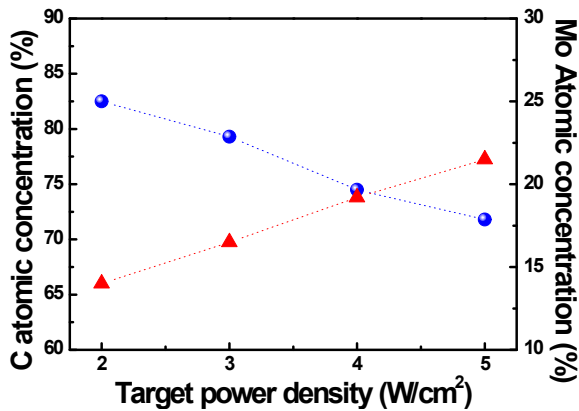


Fig. 3. C and Mo concentration in C:Mo thin films fabricated with the increase of Mo target power density.

그림 2는 타겟 전력 밀도에 따라 제작되어진 C:Mo 박막의 Rms 표면거칠기 값의 변화를 나타낸다. 그림에서 확인되어지듯이, C:Mo 박막 표면에서 측정되어진 Rms 표면거칠기 값은 Mo 타겟 전력 밀도증가에 따라 증가하였다. 이러한 결과는 박막 결합에 참여하는 금속에 의해 비정질이 나노크기로 결정화되는 과정이며, 타겟 전력 밀도는 나노결정 크기의 증가 원인을 확인할 수 있다. 또한 타겟 전력 밀도 증가로 인해 박막 표면에서 큰 에너지를 얻은 이온들의 스퍼터링에 의해 기판 온도를 증가시키고 이온에너지가 축적되어 나노결정 크기의 증가를 야기하여 기판표면에서 표면거칠기는 증가한다고 판단되어진다 [12,13].

타겟 전력 밀도에 따라 제작되어진 C:Mo 박막 내에 포함된 C와 Mo 원자 구성 비율은 XPS 분석을 통하여 분석하였고, 분석되어진 원자들의 구성 비율의 값을 그

림 3에 나타내었다. 결과에서 확인되어지듯이, Mo 타겟 전력 밀도가 증가함에 따라 박막 내 포함된 C 원자의 비율은 감소되어졌고, Mo 원자의 비율은 증가되어졌다. 이러한 결과는 Mo 타겟 전력 밀도의 증가에 따라 Mo 타겟에서 스퍼터링 되어진 Mo 원자의 비율의 증가하게 되고 기판 표면에 도달되어지는 Mo 비율의 증가로 인하여 박막내 Mo 원자 비율을 증가시킨다.

그림 4는 타겟 전력 밀도에 따라 제작되어진 C:Mo 박막의 비저항 값의 변화를 보여준다. 결과에서 보듯이, C:Mo 박막의 비저항 값은 Mo 타겟 전력 밀도 증가에 따라 증가되었다. 이러한 결과는 박막내 금속 비율인 Mo 원자의 비율이 증가되어 박막의 전도 특성 향상에 기여했다고 판단되어진다. 특히 증가된 Mo 금속 원자는 탄소와 결합하여 나노결정화에 기여하고 이는 박막의 비저항 값을 낮추는 원인이 되었다고 판단된다 [14].

그림 5는 스퍼터링 장치로 증착된 C:Mo 박막을 OTFT의 게이트 전극으로 응용하여 제작된 소자의 전기적 특성을 측정한 결과이다. 그림 5(a)는 유기박막트랜지스터의 출력(output; drain source current vs drain source voltage ($I_{DS}-V_{DS}$)) 그래프를 보여주고 있으며, 그림 5(b)는 트랜스퍼(transfer; I_D-V_G) 그래프를 보여준다. 트랜스퍼 그래프는 전형적인 전계효과 트랜지스터의 모습을 보여주고 있다. 전하의 이동도(field effect carrier mobility (μ))는 아래 식에서 도출할 수 있다 [15].

$$I_{SD(sat.)} = (WC_i/2L) \mu (V_G - V_T)^2 \quad (1)$$

W, L, C_i , V_T 는 각각 채널 폭, 채널길이, 절연층의 단위면적당 유전상수, 그리고 문턱전압(threshold

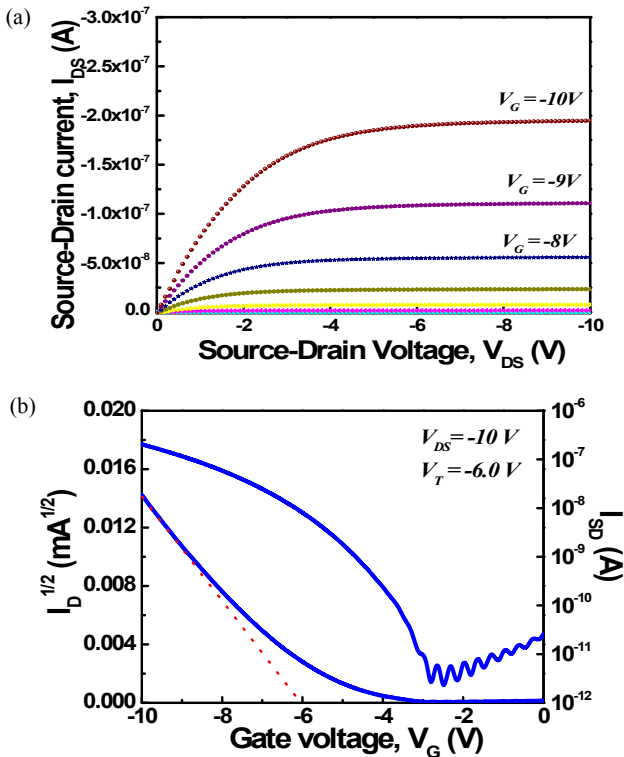


Fig. 5. (a) Output characteristics and (b) transfer characteristics of organic TFT using C:Mo gate electrode fabricated at the Mo target power density of 5 W/cm². (gate voltage; 0~-10 V)

voltage)의 값을 나타낸다. 5 W/cm²의 타겟 전력 밀도에서 제작된 C:Mo 게이트 전극을 사용한 OTFT 소자 특성에서 μ 와 V_T 의 값은 각각 0.16 cm²/V·s and -6.0 V를 나타내었고, 식 (1)에서 도출된 드레인 전류의 on/off ratio (I_{on}/I_{off})는 7.7×10^4 값을 나타내었다. 결과적으로, C:Mo 게이트 전극을 사용한 OTFT 소자의 특성들은 게이트 전극의 전도성과 관련된다는 것을 확인할 수 있으며, 스퍼터링으로 제작된 전도성 C:Mo 박막은 게이트 전극으로 응용할 수 있는 소재임을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 비대칭 마그네트론 스퍼터링법으로 Mo 타겟 전력 밀도에 따라 증착시킨 Mo 도핑 탄소 (C:Mo) 박막의 표면, 구조, 전기적 특성등을 고찰하였다. 비대칭 스퍼터링 장치로 증착한 C:Mo 박막은 균일하고, 부드러운 표면을 나타내었다. Mo 타겟 전력

밀도 증가에 따라 Rms 표면거칠기 값은 2.2 nm에서 5.5 nm까지 증가하였다. 또한 박막의 비저항 값은 타겟 전력 밀도 증가에 따라 감소하였다. 이러한 특성을 바탕으로 게이트 전극으로 C:Mo 박막을 적용하여 제작한 OTFT 소자의 전기적 특성에서 μ 와 V_T 의, I_{on}/I_{off} 값은 각각 0.16 cm²/V·s, -6.0 V, 7.7×10^4 값을 나타내었다. 결론적으로, C:Mo 전도성 박막은 OTFT 소자의 게이트 전극 소재로 적합함을 확인하였다.

REFERENCES

- [1] M. Vilkmann, T. Ruotsalainen, K. Solehmainen, E. Jansson, and J. H. Keinänen, *Electronics*, **5**, 1 (2016). [DOI: 10.3390/electronics5010002]
- [2] F. F. Vidor, T. Meyers, and U. Hilleringmann, *Electronics*, **4**, 480 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics4030480>]
- [3] I. H. Campbell, P. S. Davids, J. P. Ferraris, T. W. Haglar, C. M. Heller, A. Saxena, and D. L. Smith, *Synthetic Metals*, **80**, 105 (1996). [DOI: [https://doi.org/10.1016/S0379-6779\(96\)03689-2](https://doi.org/10.1016/S0379-6779(96)03689-2)]
- [4] N. R. Tu and C. Kao, *J. Appl. Phys.*, **85**, 7267 (1999). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.370543>]
- [5] W. A. Schoonveld, J. Vrijmoeth, and T. M. Klapwijk, *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 3884 (1998). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.122924>]
- [6] C. M. Hwiler, I. H. Campbell, D. L. Smith, N. N. Barashkov, and J. P. Ferraris, *J. Appl. Phys.*, **81**, 3227 (1997). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.364154>]
- [7] J. H. Schoen, Ch. Kloc, T. Siegrist, J. Laquindanum, and H. E. Katz, *Organic Electronics*, **2**, 165 (2001). [DOI: [https://doi.org/10.1016/S1566-1199\(01\)00022-2](https://doi.org/10.1016/S1566-1199(01)00022-2)]
- [8] J. H. Schoen, Ch. Kloc, and B. Batlogg, *Synthetic Metals*, **115**, 75, (2000). [DOI: [https://doi.org/10.1016/S0379-6779\(00\)00348-9](https://doi.org/10.1016/S0379-6779(00)00348-9)]
- [9] J. Robertson, *Mater. Sci. Eng.*, **R37**, 129 (2002). [DOI: [https://doi.org/10.1016/S0927-796X\(02\)00005-0](https://doi.org/10.1016/S0927-796X(02)00005-0)]
- [10] H. Dimigen, H. Hubsch, and R. Memming, *Appl. Phys. Lett.*, **50**, 1056 (1987). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.97968>]
- [11] K. Bewilogua, C. V. Cooper, C. Specht, J. Schroder, R. Wittorf, and M. Grischke, *Surf. Coat. Technol.*, **127**, 224 (2000). [DOI: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(00\)00666-6](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(00)00666-6)]
- [12] V. Kulikovskiy, P. Bohac, F. Franc, A. Deineka, V. Vorliceck, and L. Jastrabik, *Diamond and Relat. Mater.*, **10**, 1076 (2001). [DOI: [https://doi.org/10.1016/S0925-9635\(00\)00525-2](https://doi.org/10.1016/S0925-9635(00)00525-2)]
- [13] A. Grill, *Surf. Coat. Technol.*, **94**, 507 (1997). [DOI: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(97\)00458-1](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(97)00458-1)]
- [14] A. Czyzniewski, *Thin Solid Films*, **433**, 180 (2003). [DOI: [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(03\)00324-9](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(03)00324-9)]
- [15] G. Horowitz, *Adv. Mater.*, **10**, 365 (1998). [DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-4095\(199803\)10:5<365::AID-ADMA365>3.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-4095(199803)10:5<365::AID-ADMA365>3.0.CO;2-U)]