


유기박막트랜지스터 응용을 위한 탄소가 도핑된 몰리브덴 박막의 특성

김동현¹, 박용섭² 

¹ 조선대학교 전기공학과

² 조선이공대학교 전자과

Characteristics of Carbon-Doped Mo Thin Films for the Application in Organic Thin Film Transistor

Dong Hyun Kim¹ and Yong Seob Park²

¹ Department of Electrical Engineering, Chosun University, Gwangju 61452, Korea

² Department of Electronics, Chosun College of Science and Technology, Gwangju 61453, Korea

(Received August 1, 2023; Revised September 10, 2023; Accepted September 25, 2023)

Abstract: The advantage of OTFT technology is that large-area circuits can be manufactured on flexible substrates using a low-cost solution process such as inkjet printing. Compared to silicon-based inorganic semiconductor processes, the process temperature is lower and the process time is shorter, so it can be widely applied to fields that do not require high electron mobility. Materials that have utility as electrode materials include carbon that can be solution-processed, transparent carbon thin films, and metallic nanoparticles, etc. are being studied. Recently, a technology has been developed to facilitate charge injection by coating the surface of the Al electrode with solution-processable titanium oxide (TiOx), which can greatly improve the performance of OTFT. In order to commercialize OTFT technology, an appropriate method is to use a complementary circuit with excellent reliability and stability. For this, insulators and channel semiconductors using organic materials must have stability in the air. In this study, carbon-doped Mo (MoC) thin films were fabricated with different graphite target power densities via unbalanced magnetron sputtering (UBM). The influence of graphite target power density on the structural, surface area, physical, and electrical properties of MoC films was investigated. MoC thin films deposited by the unbalanced magnetron sputtering method exhibited a smooth and uniform surface. However, as the graphite target power density increased, the rms surface roughness of the MoC film increased, and the hardness and elastic modulus of the MoC thin film increased. Additionally, as the graphite target power density increased, the resistivity value of the MoC film increased. In the performance of an organic thin film transistor using a MoC gate electrode, the carrier mobility, threshold voltage, and drain current on/off ratio (I_{on}/I_{off}) showed $0.15 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, -5.6 V , and 7.5×10^4 , respectively.

Keywords: C-doped Mo film, Unbalanced magnetron sputtering, Resistivity, Hardness, Organic thin films transistor

1. 서론

✉ Yong Seob Park; yongspark@cst.ac.kr

Copyright ©2023 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://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.

저온공정이 가능한 스핀코팅법, 프린팅법 등의 공정을 사용하여 제작한 유기 박막 트랜지스터(organic thin film transistor, OTFT)는 대면적화가 가능하기 때문에 단가

를 낮출 수가 있으며, 유연성이 확보된 유기물을 사용하기 때문에 플렉서블 디스플레이 등 다양한 전자소자에 응용되고 있다 [1-8]. 그러나 여전히 유기반도체가 사용되는 OTFT는 전하의 이동도가 낮고, 산소와 산화반응이 빠르게 일어나기 때문에 봉지나 패키지 공정을 필수적으로 포함하며, 펜타센 유기 반도체를 제외한 모든 유기물 소재의 경우 비정질 실리콘 TFT 소자에 비해 소자의 성능이 많이 감퇴된다. OTFT의 성능 개선을 위해 고전도 특성을 지니는 유기물 소재를 개발해야 하며, 적층 기술을 발전시켜 유기물 소재층과의 전도 특성을 규명해야 하고, 특히 유기물 층과 전극과의 선택을 적절히 하여 소자의 성능을 향상시켜야 한다 [9-11]. 이러한 OTFT의 결점을 보완하기 위한 방안 중 배선의 RC delay를 최소화하는 방안으로 기존 게이트 전극 소재로 저저항 알루미늄(Al), 구리(Cu), 금(Au), 백금(Pt) 등을 사용해왔으며, 이 중 알루미늄과 구리의 경우 화학적 내성이 약하며, 고온 공정 시 배선 결함을 야기하기 때문에 주로 다층이나 합금이 된 적층구조의 게이트 전극을 선택적으로 사용하였다. 본 연구에서도 OTFT의 성능 향상을 위해 선택적 게이트 전극 소재를 개발하고자 하였으며, 특히 게이트 전극소재의 저저항 특성과 화학적 내성, 그리고 물리적 내구성 특성이 우수하며, 열에 강한 전극소재를 제작하고자 하여 기존 전도특성과 기판과의 접촉 특성이 우수한 몰리브덴(Mo) 소재에 탄소 소재를 도핑한 게이트 전극을 제안했고, 탄소 도핑량에 따른 Mo 게이트 전극을 제작하였고 기존 게이트 전극의 전도특성을 바탕으로 내구성과 유기물과의 접착특성을 향상시키고, 화학적 안정성을 확보하고자 하였다 [12-14]. 화학적으로 안정된 게이트 전극이 구현된다면 디스플레이소자 제작 시 확산 방지층(diffusion barrier), 태양전지 접촉층(contact layer)에도 응용이 가능할 것이라 판단되며, 본 연구에서는 비대칭 마그네트론 스퍼터링 방법을 이용하여 탄소(carbon)가 도핑된 몰리브덴(molybdenum) 박막들을 제작하였고, 흑연 타겟의 전력밀도(target power density)에 따라 증착된 MoC 박막의 구조, 표면, 물리적, 전기적 특성들을 측정하고 고찰하였고, MoC 박막을 게이트 전극으로 사용된 OTFT 소자를 제작하여 전기적 특성을 고찰하였다.

2. 실험 방법

탄소(carbon)가 도핑 몰리브덴(molybdenum) 박막, 즉 MoC 박막, 제작은 4인치 흑연(graphite) 타겟과 2인치 몰리브덴(molybdenum) 타겟이 부착된 비대칭 마그네트

론 스퍼터링(unbalanced magnetron sputtering) 장치를 사용하였다. $3 \times 3 \text{ cm}^2$ 크기의 실리콘 기판을 사용하였고, 챔버의 초기 진공도는 2×10^{-5} Torr로 유지하고, 순도 99.99%의 아르곤(Ar)을 가스를 주입하여 증착 압력을 2×10^{-3} Torr로 유지하고 스퍼터링하여 박막을 증착하였다. 몰리브덴(Mo) 타겟의 전력밀도는 10 W/cm^2 로 고정하였고, 흑연(graphite) 타겟의 전력밀도는 10 W/cm^2 로부터 16 W/cm^2 까지 변화시켜 MoC 박막을 제작하였다. 기판을 부착한 지그는 20 rpm 회전속도를 유지하였고, 모든 박막은 120 nm의 두께로 증착하였다. 증착된 모든 박막의 구조, 표면 거칠기, 물리적, 전기적 특성들은 field emission scanning electron microscope (FESEM: Quanta 200 FEG), Nanosystem (nano view-E1000), contact angle (Pheonix 300 Touch, S.E.O), nano-scratch tester (Anton Paar co.), 4-point probe (CMT-100)를 이용하여 측정, 고찰하였다. 박막 특성 고찰된 MoC 박막 특성 중 최적 조건을 도출하여 유기박막 트랜지스터(organic thin film transistor, OTFT)의 게이트 전극으로 적용하였다. 유리기판 위에 MoC 게이트 전극을 스퍼터링 증착 후 스펀코팅 장치를 이용하여 200 nm PVP 절연층을 코팅하고, thermal evaporator를 이용하여 절연층 위에 펜타센 활성층을 70 nm의 두께로 이용하여 증착하였다. 반도체 활성층 위에 소스/드레인 전극을 thermal evaporator를 이용하여 알루미늄(Al) 전극은 채널 길이(channel length)와 채널 폭(channel width)이 각각 $35 \mu\text{m}$ 와 $800 \mu\text{m}$ 크기인 웨도우 마스크를 이용하여 증착하였다. 제작된 OTFT 소자의 전기적 특성은 HP4145B semiconductor parameter analyzer를 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 흑연 타겟 전력밀도 증가에 따라 증착된 MoC 박막 구조적 특성을 XRD 회절패턴을 이용하여 고찰하였다. 흑연 타겟 전력밀도 증가에 따라 제작된 MoC 박막의 주피크는 $2\theta=35^\circ$ 와 62° 로서 각각 MoC (111)과 MoC (220) 피크들을 나타내며 흑연 타겟 전력밀도가 증가할수록 주 피크들의 강도가 증가하였으며, 박막 내 grain 크기를 의미하는 반치폭(FWHM)의 값은 감소하였다. MoC 박막의 결정크기는 XRD 패턴에서 반치폭과 관계가 있으며, 본 연구의 MoC 박막의 XRD 패턴에서 흑연 타겟의 전력밀도의 증가는 반치폭을 감소시켰으며, 이를 통해 결정의 크기는 향상된 것을 확인할 수 있다 [15,16]. 결과적으로 박막 증

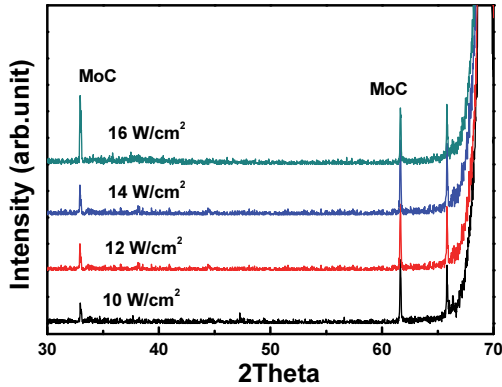


Fig. 1. X-ray diffraction spectra of MoC thin films fabricated with the increase of graphite target power density.

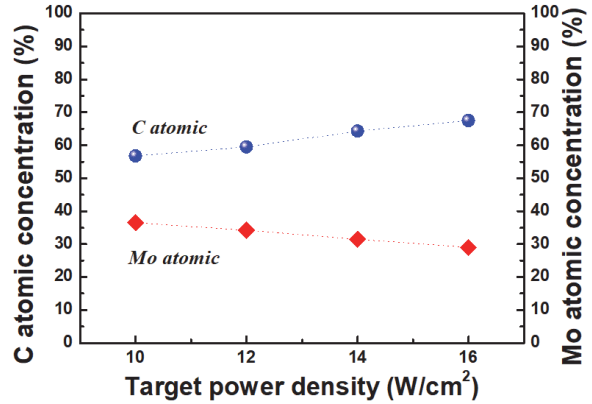


Fig. 3. C and Mo concentration in MoC thin films fabricated with the increase of graphite target power density.

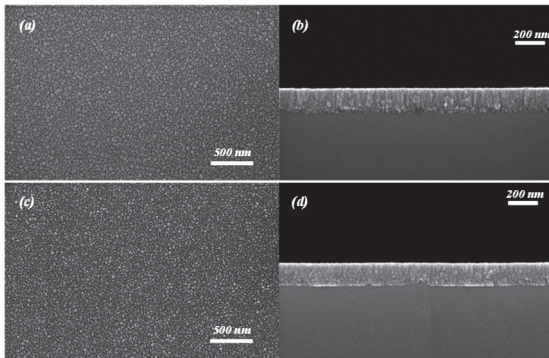


Fig. 2. FESEM surface and cross-sectional images of MoC thin films fabricated at the conditions of 10 W/cm² (a), (b) and 16 W/cm² (c), (d) graphite target power densities.

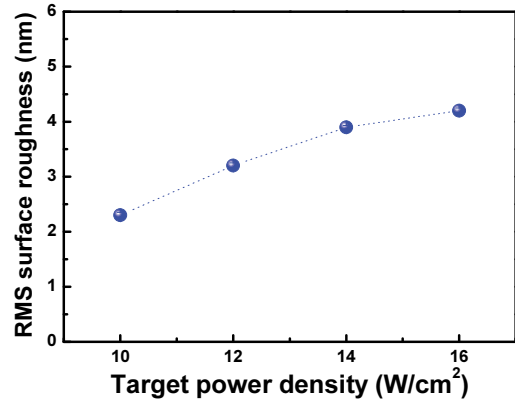


Fig. 4. RMS surface roughness values of MoC thin films fabricated with the increase of graphite target power density.

작 시 흑연 타겟 전력밀도의 증가는 박막 내 결정 특성 향상을 나타내는 grain 크기의 증가에 기여한다는 것을 확인할 수 있다.

그림 2는 흑연 타겟 전력 밀도에 따라 증착된 MoC 박막의 FESEM 표면과 단면을 나타낸다. MoC 박막 표면이미지에서 확인할 수 있듯이, 모든 박막은 결함 없는 부드럽고 균일한 표면을 나타내었고, 흑연 타겟 전력밀도의 증가는 탄소 이온들이 가지는 이온화에너지를 증가시켰고, 박막 표면에 영향을 미치는 스퍼터링 비율이 증가되어, 기존에 비정질 특성을 보이는 탄소 결합들이 이온화에너지의 증가로 인해 리스퍼터링(resputtering)을 향상시키고 Mo 원자가 seed가 되어 Mo 원자와 탄소 원자가 결합하여 결정화되며, 타겟 전력밀도의 증가는 이온화된 이온들의 스퍼터링율의 증가로 인해 기판의 표면온도를 증가시켜 탄소-금속 구조의 탄화 금속형태의 결정성을 향상시키는 것

로 판단된다.

그림 3은 FESEM EDX 분석을 통해 흑연 타겟 전력밀도 증가에 따라 증착된 MoC 박막 내에 포함된 C와 Mo 원자 구성 비율을 나타낸다. 결과에서 보듯이, 흑연 타겟 전력 밀도 증가에 따라 박막 내 포함된 C 원자의 비율이 증가되었고, Mo 원자의 비율은 감소되었고, 흑연 타겟 전력밀도 16 W/cm²일 때 MoC 박막 내 탄소원자는 68%까지 증가하였다. 결과로써 흑연 타겟 전력밀도 증가는 흑연 타겟에서 스퍼터링 된 탄소 원자의 비율의 증가시키고, 기판 표면까지 도달되어 스퍼터링된 탄소 원자 비율을 증가시키기 때문에 MoC 박막 내 포함된 탄소 원자 비율이 증가되며, 상대적으로 MoC 박막 내 Mo 원자비율은 감소한다.

전극의 표면 거칠기는 유기물 증착 시 소자 제작에 매우 중요한 인자가 되며, 본 연구에서는 nanosystem을 이용하여 표면 거칠기 값을 측정하였다. 그림 4는 흑연 타겟 전

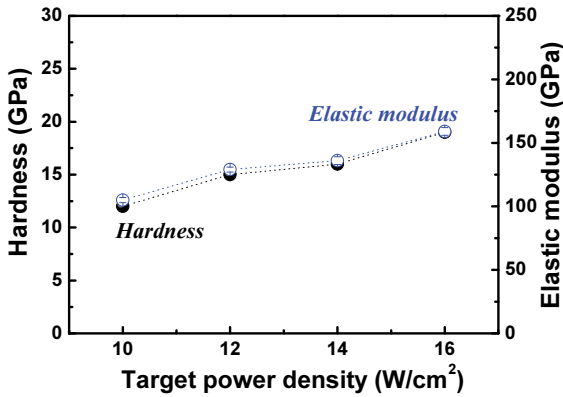


Fig. 5. Hardness and elastic modulus of MoC thin films fabricated with the increase of graphite target power density.

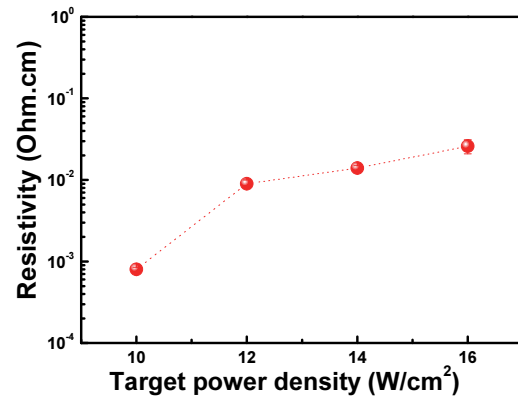


Fig. 6. Resistivity of MoC thin films fabricated with the increase of graphite target power density.

력밀도 증가에 따라 제작된 MoC 박막들의 RMS 표면 거칠기 값의 변화를 나타내며, 결과에서 보듯이, MoC 박막 표면의 RMS 표면 거칠기 값들이 낮아 부드러운 표면을 갖는 것을 확인할 수 있으며, 흑연 타겟 전력밀도의 증가에 따라 MoC 박막의 RMS 표면 거칠기 값이 증가되었다. FESEM 이미지에서 확인할 수 있듯이, 스퍼터링에 의해 증착된 MoC 박막 표면들은 부드럽고 균일한 표면을 나타내었고, 흑연 타겟 전력밀도 증가가 표면 거칠기를 다소 증가시키는 것을 확인할 수 있다. 결과로써, 일반적으로 금속은 결정화에 의해 RMS 표면 거칠기 값이 크다. 금속인 Mo에 탄소원자의 결합으로 인해 MoC 박막의 결정성이 다소 작아졌지만 RMS 표면 거칠기 값은 많이 감소하였고, 흑연 타겟 전력밀도 증가는 Mo와 결합되는 탄소 이온의 수를 증가시키게 되고 Mo에 의한 결정성은 감소하지만 높은 타겟 전력밀도의 증가는 금속이온이 seed가 되어 탄소-금속의 결합 구조에서 나노결정 구조 형태로 그 크기를 증가시킬 수 있다. 또한 흑연 타겟 전력밀도 증가는 기판 주위에서 스퍼터링 효과인 리스퍼터링(resputtering) 증가에 의해 기판 온도를 상승시키기 때문에 나노 결정성에 기여하고 결과적으로 표면의 거칠기를 다소 증가시키게 된다 [17,18].

그림 5는 흑연 타겟 전력밀도 증가에 따라 증착된 MoC 박막의 경도와 탄성계수 값의 변화를 나타내며, 결과에서 보듯이, MoC 박막의 경도와 탄성계수의 값은 흑연 타겟 전력밀도가 증가함에 따라 증가하였고, 최대값은 흑연 타겟 전력밀도 16 W/cm²일 때 각각 19 GPa 값과 155 GPa 값을 나타냈다. 이러한 값들은 표면 특성에서 확인하였듯이 흑연 타겟 전력밀도 증가가 스퍼터링 효과를 향상시켰기 때문에 가능한 것이며, 특히 타겟 전력밀도 증가는 박막 기판 주위에서 이온이식(ion implantation)과 리스퍼터링

(resputtering)을 더욱 활성화시키기 때문에 박막 내 구조적으로 결합력을 향상시키는 효과를 가진다. 특히, 금속 Mo 원자와 탄소 원자 간 결합력을 향상시키고 나노 결정화에 기여하게 되며, 결과적으로 박막 내 결합 밀집도가 증가되는데, 이는 박막의 경도와 탄성계수를 증가시키는 원인이 된다. 또한, 박막 성장 시 기판 표면에서 리스퍼터링(resputtering) 효과의 증가는 박막을 더욱 치밀하게 하는 원인이며, 결론적으로 박막의 경도와 탄성계수를 증가시킨다 [17,18].

그림 6은 흑연 타겟 전력밀도에 따라 증착된 MoC 박막의 비저항 값의 변화를 나타낸다. 흑연 타겟 전력 밀도의 증가에 따라 비저항 값은 다소 증가하였고, 비저항 최소값은 10 W/cm² 흑연 타겟 전력밀도일 때 나타났다. MoC 박막의 비저항 값은 흑연 타겟 전력밀도 증가에 따라 감소되었는데, 이러한 결과는 흑연 타겟 전력밀도 증가에 따라 박막 내 금속인 Mo 원자의 비율이 감소된 것과 관련 있는 것으로 판단된다. MoC 박막의 비저항 값은 다소 증가되었지만 MoC 비저항 값의 크기는 전극 막으로 쓸 수 있는 가능성 수치를 나타내었다. 결과에서 보듯이, 흑연 타겟의 전력밀도를 증가시켜 Mo 원자에 탄소 원자가 포함되었을 때 전기적 특성인 비저항 값이 많이 증가하지 않았기 때문에 본 연구에서 제작된 MoC 박막을 게이트 전극으로 사용할 수 있으며, 특히 박막 표면 거칠기, 경도, 탄성계수 특성등에서 확인할 수 있듯이, 박막 증착 시 흑연 타겟 전력밀도의 증가는 이온이식(ion implantation)과 리스퍼터링(resputtering) 등 스퍼터링 효과를 증가시켜 박막 내 밀도를 증가시키고 나노 결정 구조 형태를 구성하기 때문에 박막의 경도 특성이 향상되고 전기전도 특성이 비저항 값도 많은 변화가 없는 것으로 판단할 수 있다 [19,20]. 결과적으로 전기적 특성이 유지되고, 표면, 물리적 특성이 향

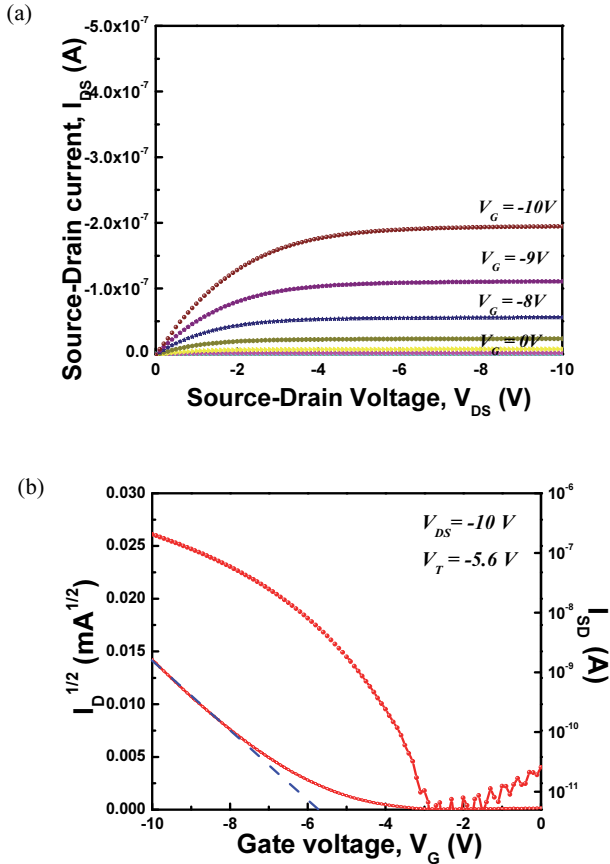


Fig. 7. (a) Output characteristics and (b) transfer characteristics of OTFT using MoC gate electrode deposited at the graphite target power density of 16 W/cm² (gate voltage: -10~0 V).

상된 MoC 박막이 개발되었다고 결론 내릴 수 있으며, 전자소자나 에너지소자 전극으로 응용하고자 한다.

그림 7은 최적 조건인 16 W/cm²에서 제작된 MoC 박막을 게이트 전극으로 사용한 유기박막트랜지스터(organic thin film transistor, OTFT)를 제작하였고, 제작한 OTFT 소자의 전기적 특성을 측정하였다. 그림 7(a)는 OTFT의 출력그래프[output, drain source current vs drain source voltage (I_{DS} - V_{DS})]를 나타내며, 그림 7(b)는 OTFT 소자의 트랜스퍼(transfer: I_D - V_G) 그래프이다. 트랜스퍼 곡선에서 전형적인 전계효과 트랜지스터 특성을 알 수 있으며, 전하의 이동도[field effect carrier mobility (μ)]의 경우 다음 식으로 도출하였다 [21-24].

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

W , L , C_i , V_T 는 각각 채널 폭, 채널 길이, 절연층의 단위 면적당 유전상수, 문턱전압(threshold voltage) 값을 나

타내며, 흑연 타겟 전력밀도 16 W/cm²에서 증착한 MoC 박막을 게이트 전극으로 사용한 OTFT 소자 특성을 고찰한 결과 μ 와 V_T 의 값은 각각 0.15 cm²/V·s and -5.6 V의 값을 가졌고, 식 (1)에서 7.5×10^4 값의 드레인 전류의 on/off 비율(I_{on}/I_{off}) 값을 구하였다. 결과로, 물리적 특성을 향상시킨 MoC 박막은 OTFT 소자의 게이트 전극으로 사용하기에 충분한 조건을 가졌다는 것을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 MoC 박막을 제작하기 위해 흑연 타겟과 몰리브덴 타겟이 부착된 비대칭 마그네트론 스퍼터링 장치를 사용하였고, 흑연 타겟 전력밀도 증가에 따라 제작된 탄소 도핑 몰리브덴(MoC) 박막의 구조, 표면, 물리적, 전기적 특성 등을 측정, 고찰하였다. 비대칭 마그네트론 스퍼터링 장치로 증착한 MoC 박막은 부드럽고 균일한 막이 형성되었으며, 흑연 타겟 전력밀도의 증가에 따라 rms 표면 거칠기 값이 2.3 nm에서 4.2 nm까지 증가하였고, 경도와 탄성계수 값은 흑연 타겟전력밀도 증가에 따라 증가하였고, 각각 16 W/cm² 흑연 타겟 전력밀도에서 19 GPa와 159 GPa의 최대값을 나타내었다. 우수한 물리적 특성을 보유한 MoC 게이트전극을 포함한 OTFT 소자의 경우 μ 와 V_T 의, I_{on}/I_{off} 값은 각각 0.15 cm²/V·s, -5.6 V, 7.5×10^4 값을 나타내었다.

ORCID

Yong Seob Park

<https://orcid.org/0000-0001-5746-4146>

REFERENCES

- [1] J. T. Mabeck and G. G. Malliaras, *Anal. Bioanal. Chem.*, **384**, 343 (2006).
doi: <https://doi.org/10.1007/s00216-005-3390-2>
- [2] M. Wu, S. Hou, X. Yu, and J. Yu, *J. Mater. Chem. C*, **8**, 13482 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1039/D0TC03132A>
- [3] D. Elkington, N. Cooling, W. Belcher, P. C. Dastoor, and X. Zhou, *Electronics*, **3**, 234 (2014).
doi: <https://doi.org/10.3390/electronics3020234>
- [4] M. Vilkmann, T. Ruotsalainen, K. Solehmainen, E. Jansson, and J. Hiitola-Keinänen, *Electronics*, **5**, 2 (2016).
doi: <https://doi.org/10.3390/electronics5010002>
- [5] F. F. Vidor, T. Meyers, and U. Hilleringmann, *Electronics*, **4**,

- 480 (2015).
doi: <https://doi.org/10.3390/electronics4030480>
- [6] I. H. Campbell, P. S. Davids, J. P. Ferraris, T. W. Hagler, C. M. Heller, A. Saxena, and D. L. Smith, *Synth. Met.*, **80**, 105 (1996).
doi: [https://doi.org/10.1016/S0379-6779\(96\)03689-2](https://doi.org/10.1016/S0379-6779(96)03689-2)
- [7] N. R. Tu and K. C. Kao, *J. Appl. Phys.*, **85**, 7267 (1999).
doi: <https://doi.org/10.1063/1.370543>
- [8] W. A. Schoonveld, J. Vrijmoeth, and T. M. Klapwijk, *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 3884 (1998).
doi: <https://doi.org/10.1063/1.122924>
- [9] C. M. Hwller, 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>
- [10] J. H. Schön, Ch. Kloc, T. Siegrist, J. Laquindanum, and H. E. Katz, *Org. Electron.*, **2**, 165 (2001).
doi: [https://doi.org/10.1016/S1566-1199\(01\)00022-2](https://doi.org/10.1016/S1566-1199(01)00022-2)
- [11] J. H. Schön, Ch. Kloc, and B. Batlogg, *Synth. Met.*, **115**, 75 (2000).
doi: [https://doi.org/10.1016/S0379-6779\(00\)00348-9](https://doi.org/10.1016/S0379-6779(00)00348-9)
- [12] J. Robertson, *Mater. Sci. Eng.*, **37**, 129 (2002).
doi: [https://doi.org/10.1016/S0927-796X\(02\)00005-0](https://doi.org/10.1016/S0927-796X(02)00005-0)
- [13] H. Dimigen, H. Hübsch, and R. Memming, *Appl. Phys. Lett.*, **50**, 1056 (1987).
doi: <https://doi.org/10.1063/1.97968>
- [14] K. Bewilogua, C. V. Cooper, C. Specht, J. Schröder, R. Wittorf, and M. Grischke, *Surf. Coat. Technol.*, **127**, 223 (2000).
doi: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(00\)00666-6](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(00)00666-6)
- [15] C. Lv, Z. Huang, Q. Yang, G. Wei, Z. Chen, M. G. Humphrey, and C. Zhang, *J. Mater. Chem. A*, **5**, 22805 (2017).
doi: <https://doi.org/10.1039/C7TA06266D>
- [16] V. Tvarozek, I. Novotny, P. Sutta, S. Flicyngerova, K. Schterevea, and E. Vavrinsky, *Thin Solid Films*, **515**, 8756 (2007).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2007.03.125>
- [17] V. Kulikovskiy, P. Bohac, F. Franc, A. Deineka, V. Vorlicek, and L. Jastrabik, *Diamond 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)
- [18] 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)
- [19] 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)
- [20] 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)
- [21] W. Tang, Y. Huang, L. Han, R. Liu, Y. Su, X. Guo, and F. Yan, *J. Mater. Chem. C*, **7**, 790 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1039/C8TC05485A>
- [22] U. Zscheschang and H. Klauk, *J. Mater. Chem. C*, **7**, 5522 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1039/C9TC00793H>
- [23] A. F. Paterson, S. Singh, K. J. Fallon, T. Hodsdon, Y. Han, B. C. Schroeder, H. Bronstein, M. Heeney, L. McCulloch, and T. D. Anthopoulos, *Adv. Mater.*, **30**, 1801079 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1002/adma.201801079>
- [24] Z. A. Lamport, H. F. Haneef, S. Anand, M. Waldrip, and O. D. Jurchescu, *J. Appl. Phys.*, **124**, 071101 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1063/1.5042255>