

Optoelectric properties of hybrid materials with Ag-nanowire and 2-dimensional structured RuO₂

Jeong Min Lee and Hee Jung Park[†]

Department of Materials Science and Engineering, Dankook University, Cheonan 31116, South Korea

(Received April 1, 2024)

(Revised April 11, 2024)

(Accepted April 16, 2024)

Abstract Two-dimensional (2D) RuO₂ nanosheets with nanometer thickness were synthesized using a chemical exfoliation method. The synthesized 2D-RuO₂ was hybridized with Ag-nanowire (NW), which is attracting attention as a next-generation transparent electrode material. After coating Ag-NW on the substrate, 2D-RuO₂ was subsequently coated on the Ag-NW. Although there was a decrease in optical transmittance, the hybridization of 2D-RuO₂ confirmed the effect of reducing sheet resistance. Furthermore, the flexibility of the fabricated transparent electrodes was also studied. It was confirmed by the change in sheet resistance after bending. The additional coating of 2D-RuO₂ improved the flexibility of the transparent electrodes.

Key words 2-dimensional RuO₂, Ag-Nanowire, Hybrid, Transparent conducting electrode, Flexibility

은나노와이어와 2차원 구조 루테튬산화물 하이브리드 재료의 광전기적 특성

이정민, 박희정[†]

단국대학교 신소재공학과, 천안, 31116

(2024년 4월 1일 접수)

(2024년 4월 11일 심사완료)

(2024년 4월 16일 게재확정)

요약 화학적 박리법을 이용하여 나노미터 두께를 갖는 2차원(2D) RuO₂ 나노시트를 합성하였다. 차세대 투명전극 소재로 주목받고 있는 Ag-nanowire(NW)와 본 연구에서 합성된 2D-RuO₂를 하이브리드화하였다. 기판 위에 Ag-NW 코팅 후 2D-RuO₂를 추가로 코팅하였다. 광투과도의 감소는 있었지만 2D-RuO₂를 하이브리드화하여 면저항 감소 효과를 확인할 수 있었다. 또한 제조된 투명전극의 유연성 실험도 진행하였다. 벤딩 후 면저항 변화로 확인하였다. 2D-RuO₂의 추가 코팅으로 투명전극 유연성이 향상되었다.

1. 서론

투명전극은 유리와 같은 투명한 기판위에 형성된 광투과성과 전도성을 가진 박막을 의미한다. 따라서 요구되는 핵심 물성은 작은 면저항(sheet resistance, R_s , ohm/sq)과 가시광선 영역에서의 높은 투과도(transmittance, T , %)이다[1,2]. 투명전극은 디스플레이, 트랜지스터, 터치패널, 태양전지 등과 같은 다양한 전자기기들을 구성하는 핵심 요소이며 현재 포화상태에 접어든 투명전극 시장에서의 경쟁력 확보를 위한 비용절감과 신기술 개발

연구가 활발히 진행되고 있다[3-5]. 또한, 웨어러블 전자기기(wearable electronics)에 대한 니즈 증가와 더불어 4차 산업혁명에 대한 관심 증가로 스마트제품과 사물인터넷 관련기기에 대한 연구개발이 활발히 일어나고 있다. 이에 부가적으로 면저항과 투과도 뿐만 아니라 유연성(flexibility)이 추가로 요구되고 있는 상황이다.

현재 사용되고 있는 투명전극 소재의 대부분은 산화물(oxide) 계열이며 이 중에서도 인듐산화물(In_2O_3)에 주석산화물(SnO_2)을 도핑한 인듐 주석 산화물($In_{2-x}Sn_xO_3$, indium-tin oxide, ITO)이 보편적이다[6,7]. 이 외에도 3가 양이온(Al, Ga 등)이 도핑된 ZnO, 1가 음이온(F, Cl 등)이 도핑된 SnO_2 가 많이 사용되고 있다. 하지만 산화물계는 세라믹으로써 유연성에 대한 원천적인 한계를 가지고 있

[†]Corresponding author
E-mail: parkjang@dankook.ac.kr

어 이를 대체하기 위한 유연 투명전극 소재가 활발히 연구 개발되고 있는 실정이다. 대표적으로 금속메쉬(Ag-mesh, Cu-mesh) 및 은나노와이어(Ag-nanowire, Ag-NW)가 개발되고 있으며 유연성과 낮은 면저항으로 최근 주목받고 있다[8-10]. 또한, 전도성을 가진 유기 고분자인 PEDOT:PSS도 우수한 유연성을 가지고 있어 주목을 받고 있다[11]. 이외에도 전도성이 매우 우수한 것으로 알려진 카본계 소재(CNT, Graphene)를 이용하려는 시도가 활발히 일어나고 있다[12,13]. 하지만 PEDOT:PSS를 포함한 전도성 고분자는 무기재료 대비 화학적 안정성, 기계적 물성(강도), 및 내열성이 부족하다[14]. 금속 메쉬는 선풍 때문에 패턴이 보일 수 있고 2장 이상의 메쉬는 모아레 현상(물결과 같은 잔상이 남는 현상)이 있을 수 있다[15]. 그래핀, 탄소나노튜브와 같은 탄소재료는 얇은 두께로 인하여 단층 코팅 시 전류량이 작고 대면적화가 쉽지 않다. 그래핀의 경우, 단결정 시 높은 전기전도도를 보이지만 다결정 및 습식 공정 제조 시 많은 결함(defects)로 전기전도도 또한 현저히 감소된다[16,17]. Ag-NW의 경우 직경이 크고 불균일할수록 헤이즈 현상(빛을 반사시켜 뿌옇게 보이는 현상)이 나타나고, 투명전극 굽힘 시 나노와이어-나노와이어 콘택(nanowire-nanowire 접촉점, junction) 부분에서의 기계적 파괴(접촉점 단락)로 면저항이 커지는 문제가 있는 것으로 알려져 있다[18]. 이를 해결하기 위해 본 연구에서 Ag-NW와 전도성 2차원(2-dimension, 2D) 소재를 하이브리드하였다. 추가되는 2차원 소재는 나노와이어-나노와이어 간 접촉점을 물리적으로 고정시킬 수 있어 면저항 감소 및 유연성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 2차원 전도성 소재로 전도성과 투광성이 우수한 루테튬산화물(RuO_2 , ruthenium-oxide) 나노시트(nanosheet)를 이용하였다[19].

2. 실험 방법

선행적으로 2D-RuO_2 나노시트를 제조하기 위하여, 먼저 K_2CO_3 (99.5%, 삼전화학), RuO_2 (99.9%, Avention) 분말을 혼합하였다. 이어, 혼합물을 알루미늄 도가니에 넣고 10시간 동안 850°C 에서 고상합성하였다. 상기 합성을 통해 $\text{K}_0.2\text{RuO}_2$ 층상구조 모상을 합성하였다. 이후 모상을 상온에서 1M 농도의 염산(HCl)을 이용하여 산처리하고 건조하였다. 건조된 루테튬산화물을 테트라부틸 암모늄 하이드록사이드(Tetra-butylammonium hydroxide, TBAOH) 수용액으로 10일 동안 화학적 박리하여 나노시트를 수득하였다. 박리되지 않은 침전물은 10분 동안 6000 rpm 속도의 원심분리를 통해 제거하였다. 최종적으로 2D 형태의 RuO_2 nanosheets(2D-RuO_2) 서스펜전을 수득하였다. 서스펜전의 농도는 약 0.7 g/L였다(UV-vis

분광분석과 Beer-Lambert law으로 계산).

투명전극 필름을 제조하기 위해 폴리이미드(PI) 기판과 Ag-NW, 2D-RuO_2 를 이용하였다(Ag-NW는 상용으로 판매하는 제품 이용(에이든, Korea)). PI 필름 위에 ① Ag-NW만 코팅한 시료(Ag-NW only)와 ② Ag-NW와 2D-RuO_2 를 코팅한 시료를 제작하였다. 2D-RuO_2 는 Ag-NW 코팅 후 윗면에 코팅하였다. 2D-RuO_2 는 1/10으로 희석시킨 서스펜전을 이용하였다. 습식 기반의 코팅 방법으로는 바코팅(bar coating, 기판을 기울이고 바를 굴려서 코팅하는 방법) 법을 이용하였다. 총 4개의 시료를 제작하였다(Ag-NW only, NS-1(Ag-NW 코팅 후 2D-RuO_2 코팅 1회), NS-2(Ag-NW 코팅 후 2D-RuO_2 코팅 2회), NS-3(Ag-NW 코팅 후 2D-RuO_2 코팅 3회)).

기초분석으로 나노시트의 결정구조와 미세구조를 분석하기 위해 X-ray diffraction(XRD)과 Transmission Electron-Microscope(TEM)을 각각 수행하였다. 투명전극의 미세구조는 Scanning Electron-Microscope(SEM)을 이용하여 분석하였다. 응용 분석으로 시료의 투명전극으로의 응용을 확인하기 위해 광학적/전기적 물성을 확인하였다. 광학적 물성으로 시료의 투과도를 UV-vis. 분광기(MEGA-U600, Sincro)를 이용하여 분석하였다. 면저항은 standard 4-point(R_s -check, RC2175, EDTM) 측정 방법으로 측정하였다. 또한, 시료의 유연성을 보기 위해 굽힘(bending) 측정을 수행하였다. 랩에서 자체 제작한 굽힘 측정기를 이용하였고 굽힘 후 저항 변화는 은페이스트 전극과 2-전극 직류법(Keithley 2400)를 이용하여 계측하였다.

3. 실험결과 및 논의

Ag-NW와 2D-RuO_2 나노시트(하이브리드 소재)로 구성된 투명전극을 제작하기 위해 먼저 2D-RuO_2 를 합성하였다. 나노시트는 루테튬산화물 층상구조체를 박리(exfoliation)하여 수득하였다. Figure 1에 도식적으로 나타내었다. 화학적 박리의 첫째 단계는 산처리 공정이다. 출발상을 1M HCl에 넣고 3일간 마그네틱 바를 이용하여 교반한다. 이렇게 하면 층간에 존재하는 알칼리 원소(K^+ 이온)이 빠져나가고 층간에 하이드로늄 이온(H_3O^+)이 들어온다. 이처럼 하이드로늄 이온이 층간 삽입되면 기존 층간 거리가 증가하게 된다. 이후 둘째 단계에서 고분자 양이온(TBA⁺, tetrabutylammonium-ion)이 녹아 있는 증류수에 산처리된 분말을 넣고 10일간 교반 해준다. 이 공정에서 고분자 양이온이 하이드로늄 이온을 치환하면서 벌크 층상구조는 더 이상 유지되지 못하고 나노시트로 박리된다. 박리된 나노시트 서스펜전 사진이 Fig. 2(a)에 나타내어졌다. 레이저 조사에 의해 빛이 산란 되는 것을 볼 수 있다. 이는 서스펜전 내에 나노입자들이

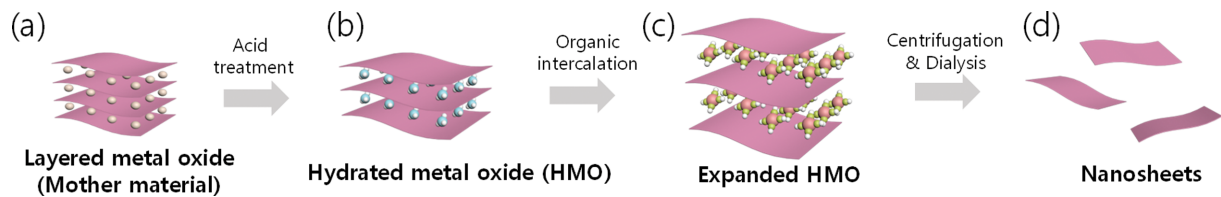


Fig. 1. Layered structure material exfoliation process (a) Layered structure pristine, (b) hydrated structure, (c) the swelling nanosheets, (d) the exfoliated nanosheets.

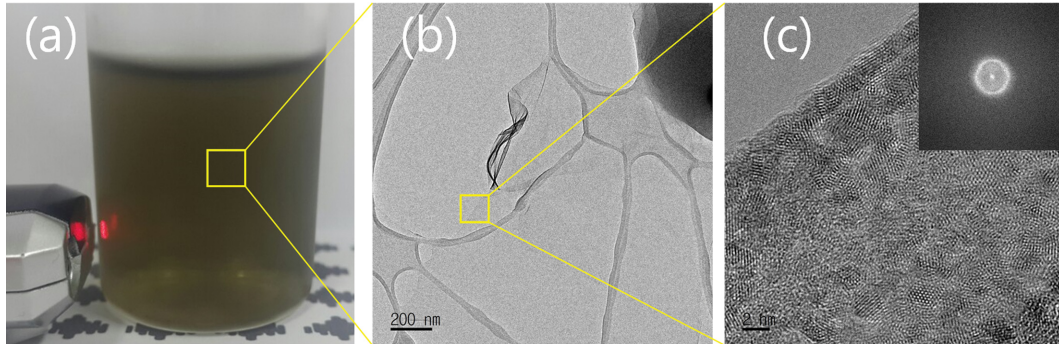


Fig. 2. (a) 2D-RuO₂ suspension. (b) TEM of the nanosheet. (c) HR-TEM of the nanosheet.

존재한다는 것으로 보여주는 결과이다. 사진에서 보여지는 것처럼 RuO₂ 나노시트 서스펜션은 어두운 색을 보였다. Figure 2(b, c)는 나노시트 TEM 이미지이다. 2차원 구조의 나노시트를 합성되었음을 확인할 수 있다. 고분해 (high-resolution) TEM과 국소영역전자회절(selective area electron diffraction, SAED) 분석으로 나노시트 내부 미세구조와 결정구조도 확인할 수 있었다. 내부는 다결정 형태이나 결정성이 좋지 않아 명확한 SAED 패턴은 관찰되지 않았다.

Figure 3은 XRD 결과를 보여준다. 박리 전 고상합성된 층상구조체 K_{0.2}RuO₂의 회절 패턴과 박리된 나노시트의 회절패턴을 보여주고 있다. 약간의 불순물이 포함

되어 있으나 목적하는 구조의 K_{0.2}RuO₂ 층상구조체가 합성되었음을 확인할 수 있다. 화학적 박리로 수득된 나노시트의 XRD 패턴은 모양은 층상구조체와 전혀 다른 결과를 보여준다. 이유는 나노시트가 페스트리(pastry) 형태로 적층된 필름의 결과이기 때문이다. 적층된 필름은 XRD 분석 시 out-of-plane 방향 ((00l)면)으로만 회절폭이 나타난다(회절폭만 보아도 나노시트 적층이고 이는 화학적 박리 물질이 나노시트라는 것을 보여주는 결과이기도 하다). 물론 층상구조체에서 K⁺ 이온이 빠져나가 RuO₂ 단층으로 구성되어 있기에 조성적인 측면에서도 전혀 다르다고 할 수 있다. XRD 분석을 통해 목적하는 층상구조체 모양과 나노시트를 확보하였음을 확인할 수 있었다.

2D-RuO₂ 나노시트 수득 후 상용 Ag-NW와 하이브리드 하여 신 투명전극을 제작하였다. 나노시트 하이브리드 효과를 확인하기위해 대조군으로 Ag-NW만 기판 위에 코팅한 시료도 제작하였다(Ag-NW only). Figure 4(a)는 제조한 4개의 시료 사진이다. SEM을 이용하여 시료의 미세구조를 확인하였으며 Fig. 4(b)에서 볼 수 있는 것처럼 Ag-NW가 잘 분산되어 코팅되었다. 나노시트를 추가로 코팅한 하이브리드 시료의 미세구조도 확인하였다. Figure 4(c, d)에서 볼 수 있는 것처럼 Ag-NW 위에 2D-RuO₂ 나노시트가 잘 코팅되어 있는 것을 볼 수 있다(나노와이어들 위에 이불 덮고 있는 것처럼 코팅됨). 이렇게 제조한 4개의 시료에 대해 광학적/전기적 물성을 계측하였다.

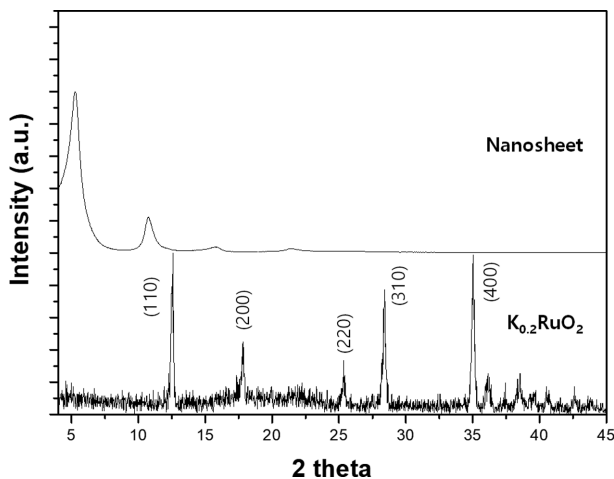


Fig. 3. XRD of 2D-RuO₂ nanosheet and pristine (K_{0.2}RuO₂).

Figure 5는 시료의 투과도(T)와 면저항(R_s) 결과이다.

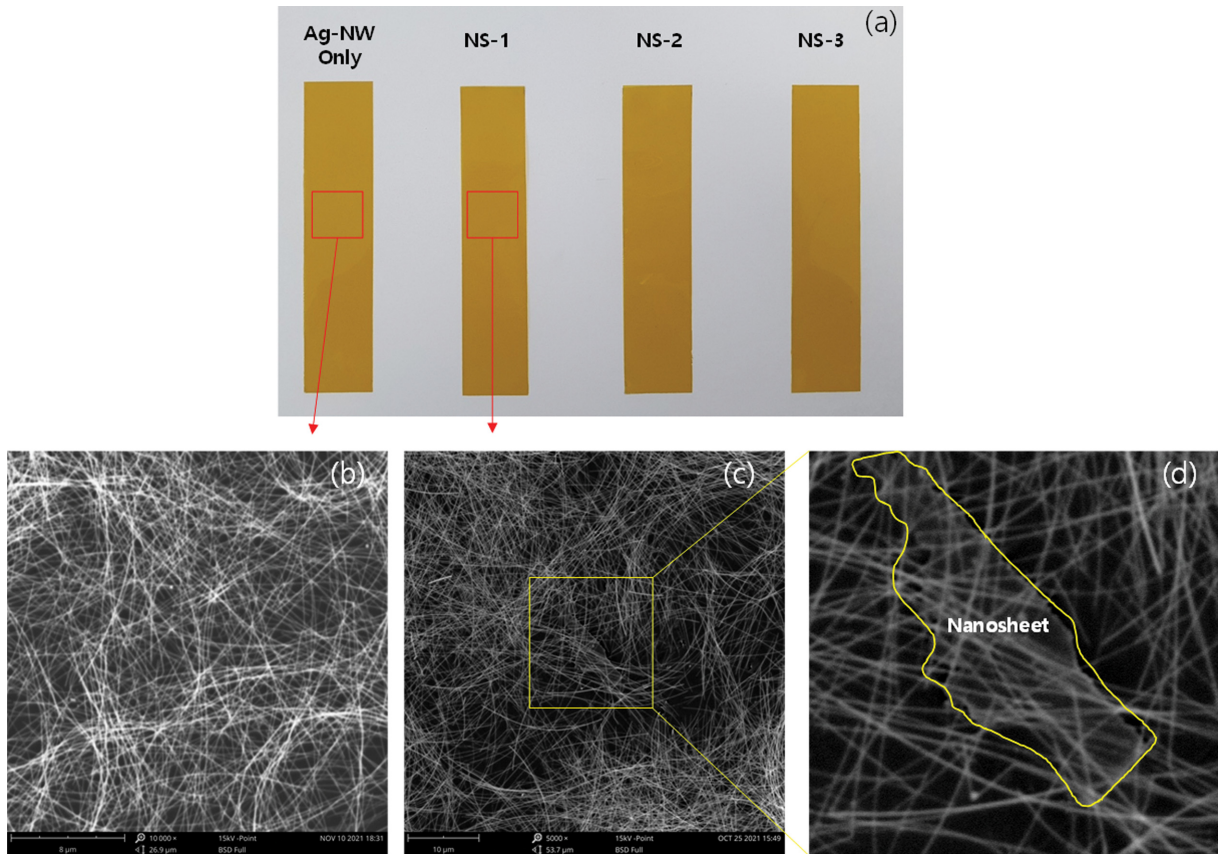


Fig. 4. Photographs of samples (a). SEM images: (b~d) the magnified images.

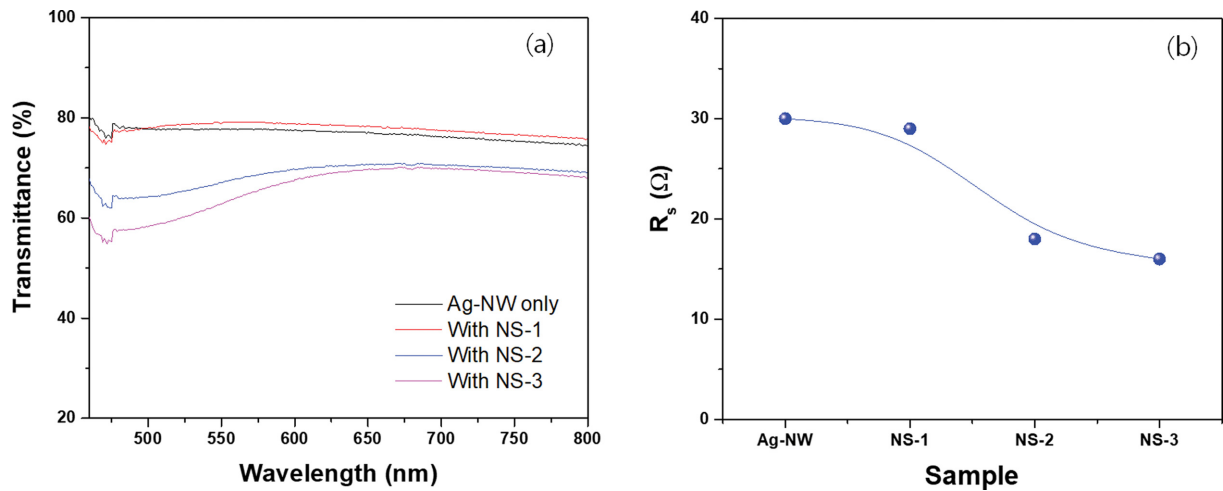


Fig. 5. The transmittance of samples as a function of wavelength. Sheet resistance (R_s) of samples.

Ag-NW only 시료의 경우 파장 550 nm에서 약 78%의 투과도를 보였다(450~800 nm에서 75% 이상의 투과도). NS-1 시료는 Ag-NW only 시료 대비 투과도 변화가 미미하였다. 반면 2D-RuO₂ 나노시트가 조금 더 두껍게 코팅된 NS-2 시료는 500 nm의 파장에서 T~67%로 감소하였다. NS-3 시료는 63%였다. 즉, NS-2와 NS-3 시료는 2D-RuO₂ 코팅에 의해 투과도가 감소하였다. 측정된

다른 파장에서도 마찬가지로 투과도가 감소하였다. H.J. Park et al.이 보고한 2D-RuO₂ 투명전극 연구 결과를 보면 RuO₂ 나노시트의 광흡수계수가 2 eV 이하에서 크게 나타남을 알 수 있다[19]. 따라서 2D-RuO₂가 두껍게 코팅될수록 투과도 감소가 예상된다. 반면, 면저항 측면에서는 유리할 수 있다. Ag-NW 투명전극은 작은 면저항을 보이는 것으로 알려져 있다[20]. 하지만 나노와이어

와 나노와이어의 접촉 저항이 크기 때문에 Ag-nanowire 만의 전기전도도가 반영된 저항 구현은 어려운 상황이다 [20]. 이를 위해 다양한 방법이 시도되고 있다. 한가지는 고온에서 열처리하여 접촉 저항을 줄이는 것이다[21]. 본 연구에서는 2D-RuO₂가 추가 코팅되었고 Fig. 4(c, d)에서 볼 수 있는 것처럼 나노시트가 나노와이어 위에 코팅되어 나노시트를 물리적으로 잡아주고 있기 때문에 와이어 간 물리적 연결이 향상되었을 것이다. 이 결과는 Fig. 5(b)에서 확인할 수 있다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 나노시트가 코팅될수록 면저항이 줄어드는 것을 알 수 있다. Ag-NW only의 경우 약 30 ohm/sq였고, NS-1, NS-2, NS-3는 각각 29 ohm/sq, 18 ohm/sq, 16 ohm/sq이었다. 결론적으로 Ag-NW 위에 2D 나노시트의 하이브리드화는 투과도 및 면저항을 감소시키는 것을 알 수 있다. 투명전극 응용을 고려하면 광학적 특성 측면에서는 단점으로, 전기적 특성 측면에서는 장점으로 작용할 것으로 예상된다. 광학적·전기적 특성 외에 차세대 투명전극에서 요구되는 중요한 특성은 유연성(flexibility)이다. 하기 실험에 유연성 결과를 나타내었다.

Figure 6은 벤딩 실험결과이다(벤딩 시 필름 구조 및 벤딩 반경 정의를 모식도로 내삽하였다). 벤딩 실험결과 벤딩 반경이 줄어들어도 면저항 변화가 거의 없는 것을 알 수 있다(벤딩 반경이 2 mm 일 때 약간 증가함). Ag-NW only 시료를 포함하여 NS-1, NS-2, NS-3 모두 면저항 변화가 미미하였다. 하지만 벤딩 실험을 반복적으로 수행 시 면저항 증가가 확인되었다. Figure 7은 벤딩 반경 3 mm에서 반복적으로 벤딩 후(벤딩 횟수, # of bending) 면저항 변화율을 나타낸 그림이다. Ag-NW only 시료의 경우 500회 이전에 급격히 면저항 변화가 커지는(면저항이 커지는) 것을 볼 수 있다. NS-2 시료도

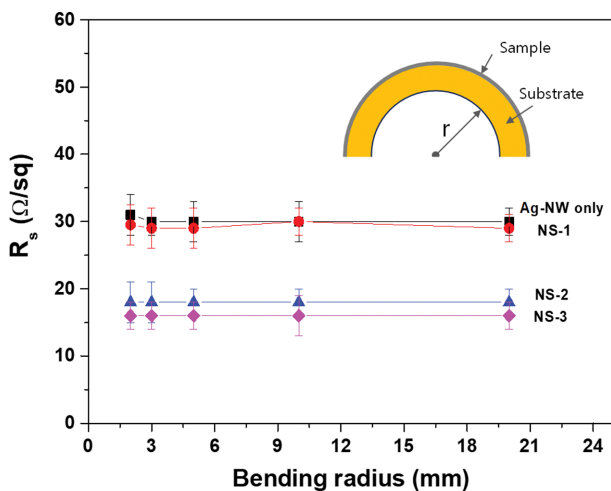


Fig. 6. R_s as a function of bending radius for Ag-NW only and NS-#, where R_0 is the initial R_s and ΔR is the difference in R before and after bending.

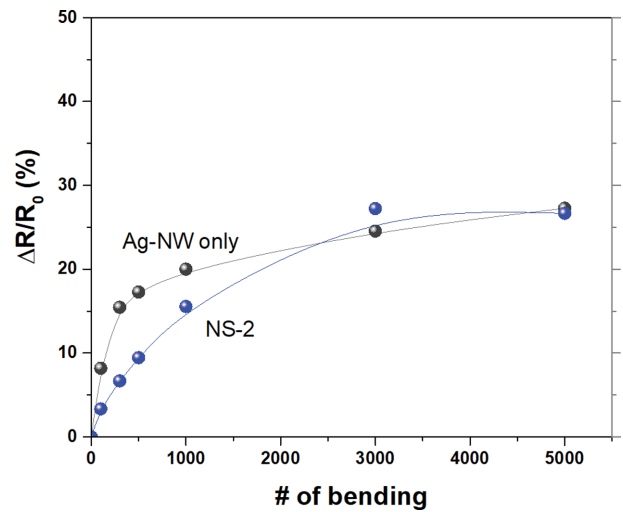


Fig. 7. The results corresponding to the number of bending tests (where R_0 is the initial R_s and ΔR is the difference in R before and after bending).

면저항 변화가 커지나 Ag-NW only 시료 대비 상대적으로 작게 변화됨을 알 수 있다. 5000회의 벤딩 실험 후 유사한 변화율을 보일지라도 1000회 이전의 벤딩에서는 NS-2 시료의 변화가 작음을 명확히 알 수 있다. 이는 앞서 기술한 것처럼 나노시트가 나노와이어 간 접촉 불안정성을 상쇄시켜 주기 때문인 것으로 판단된다.

결론적으로 본 연구에서 나노시트의 하이브리드화를 통해 Ag-NW의 접촉점 고정효과(pinning-effect)가 나타난 것으로 사료되며, 이를 통해 순수 Ag-NW 투명전극의 문제점으로 여겨지는 면저항 증가 및 유연성 부족을 개선할 수 있었다. 하지만 중요 특성인 투과도가 감소되는 경향을 보이기 때문에 이 부분에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 사료된다. 나노와이어와 나노시트의 하이브리드 전략으로 면저항 감소, 유연성 개선과 더불어 투과도까지 향상시킬 수 있다면 차세대 투명전극 소재 개발의 신 플랫폼 전략이 될 수 있을 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서 2차원 층상구조체 고상합성과 화학적 박리 방법을 이용하여 2차원 구조의 RuO₂ 나노시트를 합성하였다. 합성된 2D-RuO₂와 상용 Ag-NW를 이용하여 두 소재가 포함된 하이브리드 투명전극을 제조하였다. 광·전기적 특성 평가 실험 결과, Ag-NW 위에 2D-RuO₂ 코팅 시 면저항은 감소되었지만 상용하여 투과도도 감소하였다. 투명전극 응용 측면에서 투과도의 감소는 단점이지만 면저항이 감소된 긍정적인 측면도 확인할 수 있었다. 추가적으로 투명전극의 벤딩 실험(유연성 확인 실험)도 수행되었다. 2D 소재의 하이브리드화로 면저항 변

화가 줄어들음을 확인할 수 있었다. 즉, Ag-NW 단독 사용하는 것보다 2D 하이브리드화가 유연성 측면에서 유리함을 알 수 있었다. 본 연구를 통해 차세대 유연 투명 전극 후보 소재를 탐색할 수 있었다.

Acknowledgements

This research was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Korean government (Ministry of Science and ICT (MSIT)) (No. RS-2023-00236572). The Department of Materials Science and Engineering was supported through the Research-Focused Department Promotion & Interdisciplinary Convergence Research Project as a part of the Support Program for University Development for Dankook University in 2023.

References

- [1] H.J. Park, J. Kim, J.H. Won, K.S. Choi, Y.T. Lim, J.S. Shin and J.U. Park, "Tin-doped indium oxide films for highly flexible transparent conducting electrodes", *Thin Solid Films* 615 (2016) 8.
- [2] J.M. Oh, M. Nasir, B. Ryu, H.J. Yun, C.J. Choi, J.S. Bae and H.J. Park, "Anomalous optoelectric properties of an ultrathin ruthenium film with a surface oxide layer for flexible transparent conducting electrodes", *Adv. Fun. Mat.* (2021) 2109330.
- [3] A. Stadler, "Transparent conducting oxides-an up-to-date overview", *Mater.* 5 (2012) 661.
- [4] K. Ellmer, "Past achievements and future challenges in the development of optically transparent electrodes", *Nat. Photonics* 6 (2012) 809.
- [5] O.K. Varghese, M. Paulose and C.A. Grimes, "Long vertically aligned titania nanotubes on transparent conducting oxide for highly efficient solar cells", *Nat. Nanotechnol.* 4 (2009) 592.
- [6] V.G. Kytin, V.A. Kulbachinskii, O.V. Reukova, Y.M. Galperin, T.H. Johansen, S. Diplas and A.G. Ulyashin, "Conducting properties of $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ thin films at low temperatures", *Appl. Phys. A* 114 (2014) 957.
- [7] M. Huang, Z. Hameiri, A.G. Aberle and T. Mueller, "Influence of discharge power and annealing temperature on the properties of indium tin oxide thin films prepared by pulsed-DC magnetron sputtering", *Vac.* 121 (2015) 187.
- [8] D.S. Hecht, L. Hu and G. Irvin, "Emerging transparent electrodes based on thin films of carbon nanotubes, graphene, and metallic nanostructures", *Adv. Mater.* 23 (2011) 1482.
- [9] X. Chen, X. Wu, S. Shao, J. Zhuang, L. Xie, S. Nie, W. Su, Z. Chen and Z. Cui, "Hybrid printing metal-mesh transparent conductive films with lower energy photonically sintered copper/tin Ink", *Scientific Reports* 7 (2017) 13239.
- [10] Y. Jia, C. Chen, D. Jia, S. Li and C. Ye, "Silver nanowire transparent conductive films with high uniformity fabricated via a dynamic heating method", *ACS Appl. Mat. & Inter.* 8 (2016) 9865.
- [11] A. Mauro, R. Diana, I.A. Grimaldi, F. Loffredo, P. Morvillo, F. Villani and C. Minarini, "Polymer solar cells with inkjet-printed doped-PEDOT:PSS anode", *Polymer Composites* 34 (2013) 1493.
- [12] K.S. Kim, Y. Zhao, H. Jang, S.Y. Lee, J.M. Kim, K.S. Kim, J.H. Ahn, P. Kim, J.Y. Choi and B.H. Hong, "Large-scale pattern growth of graphene films for stretchable transparent electrodes", *Nat.* 457 (2009) 706.
- [13] X. Huang, T. Leng, M. Zhu, X. Zhang, J. Chen, K. Chang, M. Aqeeli, A.K. Geim, K.S. Novoselov and Z. Hu, "Highly flexible and conductive printed graphene for wireless wearable communications applications", *Scientific Reports* 5 (2015) 18298.
- [14] F. Alamer, K. Althagafy, O. Alsalmi, A. Aldeih, H. Alotaiby, M. Althebaiti, H. Alghamdi, N. Alotibi, A. Saeedi, Y. Zabarmawi, M. Hawsawi and M. Alnefaie, "Review on PEDOT:PSS-based conductive fabric", *ACS Omega* 7 (2022) 35371-353-86.
- [15] H.B. Lee, W.Y. Jin, M.M. Ovhal, N. Kumar and J.W. Kang, "Flexible transparent conducting electrodes based on metal meshes for organic optoelectronic device applications: a review", *J. Mat. Chem. C* 7 (2019) 1087.
- [16] S. De and J.N. Coleman, "Are there fundamental limitations on the sheet resistance and transmittance of thin graphene films", *ACS Nano* 4 (2010) 2713.
- [17] H.A. Becerril, J. Mao, Z. Liu, R.M. Stoltenberg, Z. Bao and Y. Chen, "Evaluation of solution-processed reduced graphene oxide films as transparent conductors", *ACS Nano* 2 (2008) 463.
- [18] T. Tokuno, J. Nogi, M. Karakawa, J. Jiu, T.T. Nge, Y. Aso and K. Suganuma, "Fabrication of silver nanowire transparent electrodes at room temperature", *Nano Research* 4 (2011) 1215.
- [19] H.J. Park, K. Lee, I.D. Kim, S.J. Choi and B. Ryu, "Abnormal optoelectric properties of two-dimensional protonic ruthenium oxide with a hexagonal structure", *ACS Appl. Mat. & Inter.* 10 (2018) 22661.
- [20] J. You, S.M. Lee, H.S. Eom and S.T. Chang, "Highly transparent conducting electrodes based on a grid structure of silver nanowires", *Coatings* 11 (2021) 11010030.
- [21] M. Kaikanov, A. Kemelbay, B. Amazhulov, G. Demeuova, G. Akhtanova, F. Bozheyev and A. Tikhonov, "Electrical conductivity enhancement of transparent silver nanowire films on temperature-sensitive flexible substrates using intense pulsed ion beam", *Nanotechnology* 32 (2021) 145706.