

특집 : 전기장 투과 전극의 연구동향

나노 소재 기반의 전기장 투과 전극에 관한 연구동향

이재형 · 신재혁 · 이상일 · 박원일[†]

한양대학교 신소재공학과

Review on Electric-field Transparent Conduct Electrodes Based on Nanomaterials

Jae Hyung Lee, Jae Hyeok Shin, Sang Il Lee, and Won Il Park[†]

Division of Materials Science and Engineering, Hanyang University, 222, Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul 04763, Korea

(Received December 2, 2019; Corrected March 4, 2020; Accepted March 5, 2020)

Abstract: The ‘field-effect’ underlies the operation of most conventional electronic devices. However, effective control and implementation of the field-effect in semiconductor devices are limited due to screening of the electric-field by conducting electrodes. Thus far, the electronic devices have necessarily been designed to avoid or minimize the electric-field screening effect. As an alternative approach to this, a new type of conducting electrodes which would be transparent to both visible light and electric-field while being electrically conductive have been developed. Here, we define these electrodes as ‘electric-field transparent electrodes’ and provide a review on related work. Particular attention is paid to the material selection and design strategies to enhance the electric-field transparency of the electrodes while maintaining good electrical conductivity and optical transparency. We then introduce potential applications of the electric-field transparent electrodes in electronic and optoelectronic devices.

Keywords: Electric field transparent electrode, electrode, Silver nanowire, Graphene, Graphene mesh

1. 서 론

최근 전기, 전자, 광전자 분야의 급속한 발전과 더불어 소자들이 소형화, 집적화, 다기능화 되어가고 있으며, 환경 및 에너지 문제와 관련하여 친환경적인 신재생 에너지의 필요성이 크게 대두되고 있다. 화석 연료를 대체할 수 있고 지속적으로 사용할 수 있는 신재생 에너지는 에너지 공급의 불안정을 대비할 수 있을 뿐만 아니라 온실가스의 배출량을 크게 감소시킬 수 있는 대표적인 기술로 꼽히고 있으며, 신재생 에너지를 이용한 광전자 소자의 성능을 향상시키기 위한 연구도 활발히 진행되고 있다. 특히 광검출기, 태양전지와 같은 광전자 소자의 성능을 향상시키기 위해서는 indium tin oxide (ITO), fluorine doped tin oxide (FTO) 등의 우수한 전기 전도도와 높은 빛 투과도 특성을 갖는 투명 전극에 대한 연구가 필수적으로 진행되어야 한다.¹⁻⁵⁾ 하지만 이러한 투명 전극과 같은 전도체의 경우에는 내부에 존재하는 다량의 자유전하들이 도체 내부의 전위를 상쇄시키기 때문에 광전자 소자의 주요 동작 기구인 전기장을 투과시키지 못하는 문제로 인해 성능 향상에 문제가 발생했다. 비록 전기장 차

폐를 최소화하기 위해 패터닝 방법을 이용하여 개구율(opening ratio)을 높였지만, 이전보다 전기 전도도가 감소하였고, 전기장을 효과적으로 투과시키지 못할 뿐만 아니라 소자의 기본 구조, 제작 공정, 성능 등에도 많은 제약이 따랐다.⁶⁻⁸⁾

이를 극복하기 위한 방안으로 높은 빛 투과도와 우수한 전기 전도도를 가지면서 동시에 전기장을 투과시킬 수 있는 이른바 ‘전기장 투과 전극(electrical-field transparent electrode)’을 도입하여 외부에서 인위적으로 전계를 인가하여 소자의 성능을 최적화 하는 새로운 시도가 제안되었다.⁹⁻¹³⁾ 전기장 투과 전극은 비교적 우수한 전기전도도를 갖고, 빛과 더불어 전기장이 상당량 투과 가능 하도록 설계되었다. Fig. 1에서 기존의 전극들과 전기장 투과 전극을 나타내었다.¹³⁻¹⁸⁾ 전극 재료의 전기장 차폐라는 물리적 제약에서 벗어나 기존 반도체 소자의 성능을 향상시키거나, 태양전지 등의 광전 소자의 성능 및 에너지 변환 효율을 향상시킨 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서는 전극의 소재 발달 과정 및 활용 범위 대해 소개하고, 이를 활용한 전자 소자와 광전 소자 응용에 대한 최근 연구동향을 소개하고자 한다.

[†]Corresponding author

E-mail: wipark@hanyang.ac.kr

© 2020, The Korean Microelectronics and Packaging Society

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.

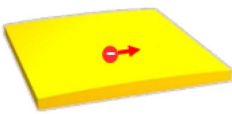
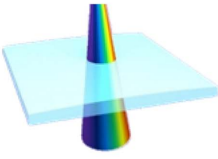
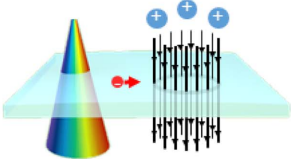
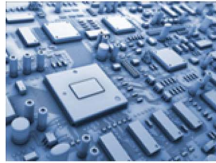
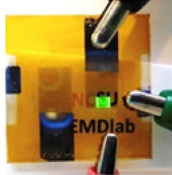
	Conduct electrode	Transparent conduct electrode	Electric-field transparent conduct electrode
Schematic			
Application			
characteristic	good electrical conductance	good optical transmission	good ϵ -field penetration

Fig. 1. Characteristics of conventional/transmittance/electric-field transparent electrodes.

2. 전극 소재의 기술 발달과 활용 범위

2.1. 나노 패턴 기반의 금속 소재

노스캐롤라이나 주 주립대학교의 Franky So 그룹에서는 나노 패턴 기반의 전극 소재를 패턴 공정으로 그물망(Nano-mesh) 형태의 패턴을 갖는 금속 전극을 제작하였다.^{14,19-21)} 이렇게 제작된 전극을 Fig. 2(a)에 주사전자현미경으로 확인하였다. 패턴된 금속 전극은 금속 특성에 따라 전기 전도성이 매우 우수하고, 패턴된 부분을 통하여 전기장이 투과 할 수 있도록 설계되었다. 하지만 남아있는 전극 부분에서 빛을 투과하지 못 할 뿐만 아니라, 금속 내부에 존재하는 다량의 자유전자들이 도체 내부의 전위를 상쇄시키는 방향으로 이동하기 때문에 전기장을 차단하게 되었다. 대표적인 금속 전극인 구리의 경우 전기장 유효 투과 깊이가 약 0.55 Å인 것을 고려하였을 때 패턴 부분을 제외하면 전기장이 거의 투과하지 못하는 것을 확인하였고, 나노 크기의 패턴 공정이 복잡하여 공정상의 어려움과 비용이 많이 드는 단점이 있다.

2.2. 1D 소재 기반의 전극 소재

1D 소재 기반의 전극은 은 나노선 또는 탄소나노튜브 등의 1D 소재들의 배열 또는 네트워크화를 통한 연구를 플로리다 대학교의 G. Rinzler 교수 그룹에서 진행하였다.^{12,15,19,21-24)} Fig. 2(b)의 주사전자현미경의 이미지처럼 1D 소재 전극은 배열된 공간 사이로 빛 또는 전기장이 투과할 수 있는 모양으로 되어 있고, 나노 패턴 기반의 금속 전극보다 개구율이 높기 때문에 투명도와 전기장 투과도를 향상시킨 연구가 진행되었다. 하지만, 배열된 나노와이어들 사이에서 발생하는 Contact 저항과 Junction 저항으로 인하여 전기 전도성이 감소하게 되는 문제점이 있다.

2.3. 2D 소재 기반의 전극 소재

그래핀은 약 0.3 nm의 원자층 두께로 매우 얇고 비교적 높은 전기전도도를 가지며, 재료적 특성으로 빛과 전기장의 대부분을 투과시킬 수 있다. 또한, 그래핀은 97.7% 빛을 투과시키고, 외부의 전계에 의해 페르미 준위가 변하는 반금속성 특성 때문에 상당량의 전기장 투과가 가능한 특성을 갖고 있다. 이러한 그래핀의 특성을 이용하여, 중국 저장대학교의 Deren Yang 그룹은 태양전지의 효율 향상에 관한 연구를 진행하였다.^{25,26)}

본 연구 그룹에서는 그래핀의 전기장 투과를 더 향상시키기 위해서 Fig. 2(c)의 사진과 같이 나노 스케일의 홀 패턴 배열을 가지는 그래핀 메쉬 전극을 제안하였다. 성장된 그래핀 메쉬는 그래핀의 손상을 줄이기 위해 패턴 공정을 진행하지 않고, 실리카 비드를 이용하여 배열된 홀 패턴을 갖는 그래핀 메쉬를 직접 성장시켰다.^{10, 13)} 그 결과 그래핀 메쉬는 기존 전극과 비슷한 전기 전도성과 빛 투과도를 갖는 특성을 보임과 동시에, 전 영역에 효과적으로 전계 효과를 인가할 수 있어서, 전기전도도의 큰 손실없이 그래핀의 높은 전기장 투과도 특성을 보였다.

3. 전기장 투과 전극을 활용 소자에 관한 연구

3.1. 트랜지스터의 구조 및 공정

차세대 유연 소자 및 디스플레이의 구동 소자로 활용하기 위해, 비정질 혹은 다결정 산화물 박막과 유기물 박막을 이용한 트랜지스터 연구가 활발히 진행되어 왔다. 하지만 이 경우, 낮은 전하 이동도와 긴 채널 길이로 인해 높은 구동 전압이 필요하며 구동 속도가 저하되는 문제점이 발생하였다. 이 문제를 해결하기 위해 홀 패턴의 금속 전극을 이용하여 수직 구조의 유기물 트랜지스터를 개발하였다. Fig. 3(a)는 수평적 구조의 트랜지스터와 수직 구조의 트랜지스터의 구조와 전류 방향을 나타내었

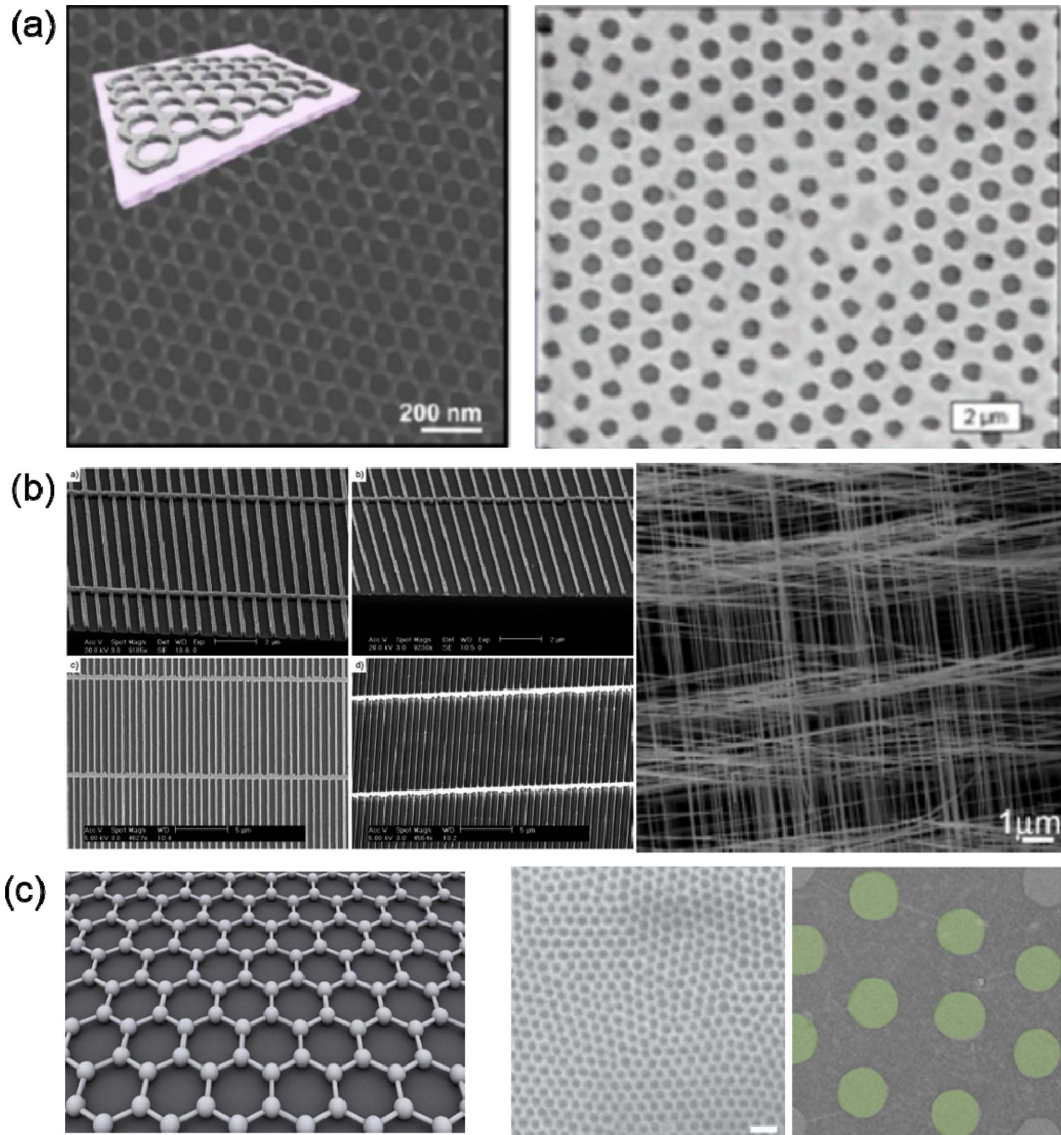


Fig. 2. SEM image of (a)metal electrode patterned with nano-mesh (b)silver nanowire. (c) A Schematic of graphene and SEM image of graphene mesh.

다. 이와 같이 유기물 박막의 얇은 두께 방향으로 전하가 이동하기 때문에 낮은 구동 전압으로도 속도가 빠른 트랜지스터 소자를 구현하였다.^{6,14,15,19,21,27-29)}

2012년에 삼성종합기술원에서는 그래핀과 실리콘 쇼트키 접합을 이용한 배리스터(Barristor)가 개발되었다. Fig. 3(b)과 같이 배리스터는 수직적 구조를 갖고 있으며, 외부 전계 효과에 의한 그래핀의 일함수 변화를 이용하여 전류 밀도를 10^4 A/cm^2 까지 증가시키고, on/off ratio를 10^5 까지 향상시키는 연구가 진행되었다.¹⁸⁾ 배리스터의 경우도 전계 효과에 의해 그래핀의 페르미 준위가 변하게 된다는 점에서 전기장 투과 전극을 이용한 예로 볼 수 있다.

3.2. 태양전지의 에너지 변환 효율 극대화

태양전지의 효율을 최적화하기 위해서는 빛의 손실을 최소화 하고, 내부 확산 전위를 통해 빛에 의해 생성된 전자와 정공들이 재결합없이 공핍층으로 확산 및 수집

이 되어야 한다.^{23,26,30)} 태양전지의 효율을 향상시키는 방법으로 p-n 접합 또는 쇼트키 접합 등에 의해 형성되는 내부 확산 전위를 증가시키는 방법과 전기장 투과 전극을 이용하여 외부의 전기장을 태양전지 내부의 활성층 안으로 인가하여 활성층을 확장시키는 방법이 있다. 그리고 도핑이 어려운 재료들을 외부 전계를 이용하여 공핍층을 확장시키는 방법으로 효율을 향상시키는 연구가 진행되었다.^{13,25,31)}

Fig. 4는 탄소나노튜브 전극의 비어있는 공간을 통하여 실리콘 부분에 효과적으로 전기장을 가하여 탄소나노튜브-실리콘 쇼트키 접합 태양전지의 효율을 향상시켰다. 유전체로는 이온성 액체(Ionic liquid)를 사용하여 외부 전계 효과를 가하여 4%에서 11%까지 효율을 향상시켰다. 더 구체적으로 효율의 증가량을 확인하기 위해 그래핀과 그물망 형태의 패턴을 갖는 그래핀 메쉬를 이용하여 외부 전계가 그래핀-실리콘 쇼트키 접합에 미치는 영향

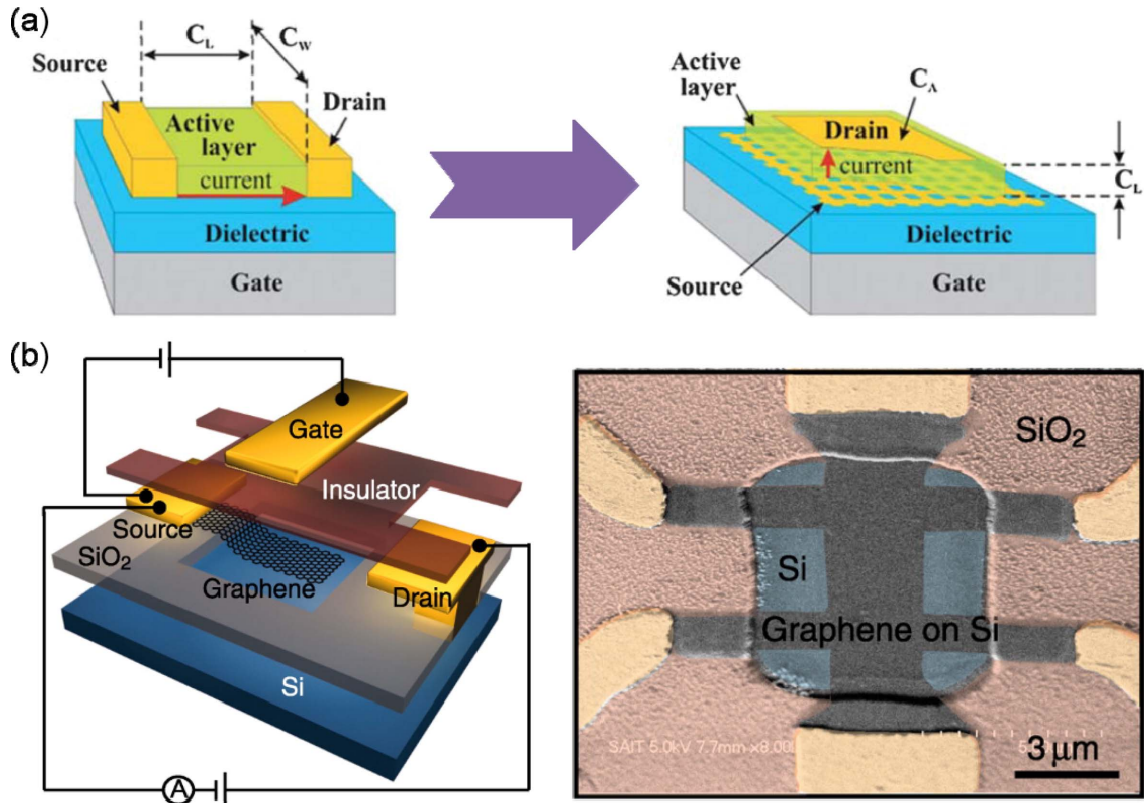


Fig. 3. (a) Structure of parallel transistor and vertical transistor (b) 3-Dimensional schematic of barristor and False-colored SEM image of the Barristor.

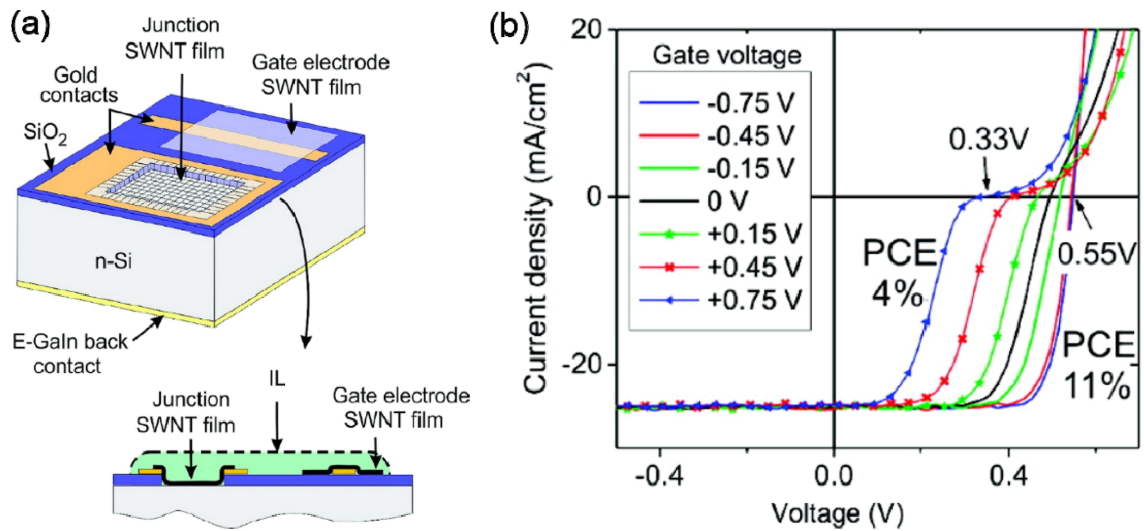


Fig. 4. (a) 3-Dimensional schematic of Si-SWNT solar cell device and cross-section view. (b) J-V curves of the illuminated Si-SWNT solar cell with external bias.

과 태양전지의 효율을 향상시킨 연구를 Fig. 5에 나타내었다. 그래핀과 그래핀 메쉬의 전류-전압 그래프를 보았을 때, 그래핀 메쉬 소자의 효율 증가율이 그래핀 소자의 효율 증가율보다 훨씬 더 큰 것을 알 수 있다. Fig. 5(b)에서 전계 효과가 패턴이 없을 때 보다, 패턴 부분에서 더 효과적으로 영향을 미치는 것을 유한요소 분석법(FEA, finite element analysis) 모델링으로 확인하였다. 그 결과

외부 전계 효과에 의한 그래핀 소자의 경우 외부 전압이 0 V에서 -1 V까지 증가함에 따라 효율이 6.5%에서 7.0%로 증가율이 8%인데 비해, 그래핀 메쉬 소자의 효율은 5.6%에서 8.0%까지 증가하였고 증가율은 42%였다.¹⁰⁾ 이와 같이 그래핀 소자 보다 그래핀 메쉬 소자에서 외부 전계에 의한 효율 증가율이 5배 이상 더 크게 나타나는 것을 보여주었다. ‘Shockley-Queisser’ 이론에 따르면, 실리

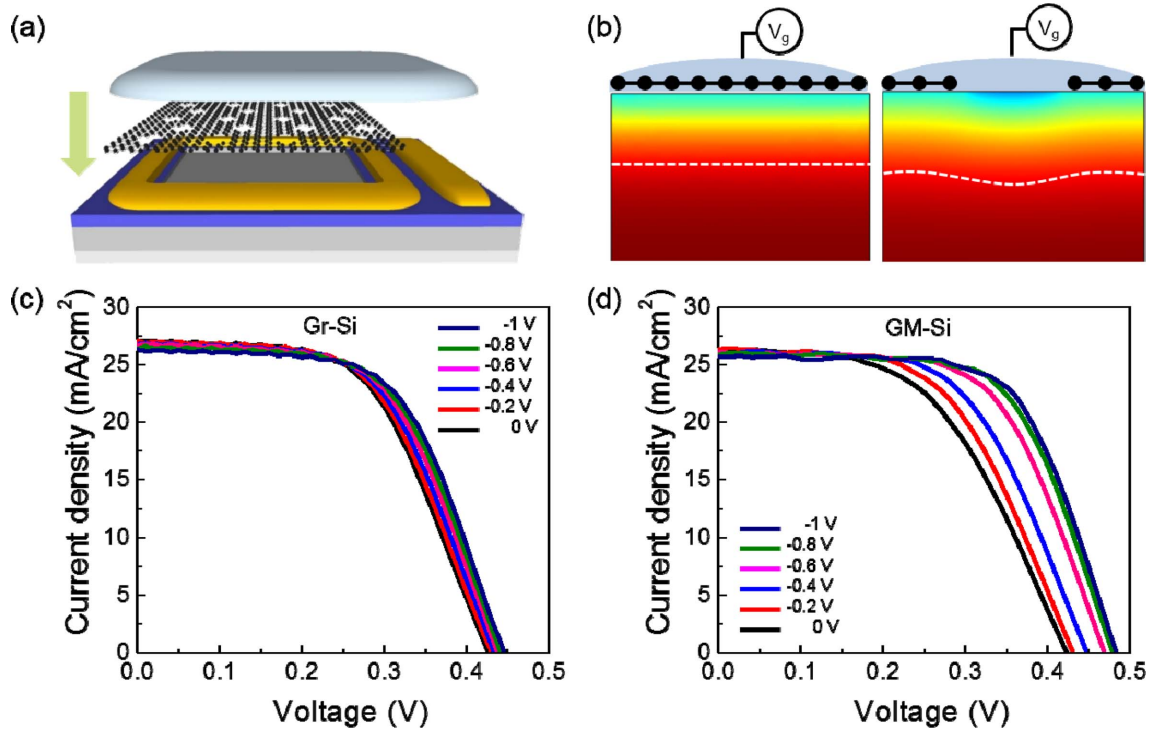


Fig. 5. (a) 3-Dimensional schematic of graphene mesh-Si schottky junction solar cell device (b) FEA simulation for graphene-Si and graphene mesh-Si Schottky junction solar cell with an external bias. (c, d) J-V curves of the graphene-Si and graphene mesh-Si Schottky junction solar under illumination.

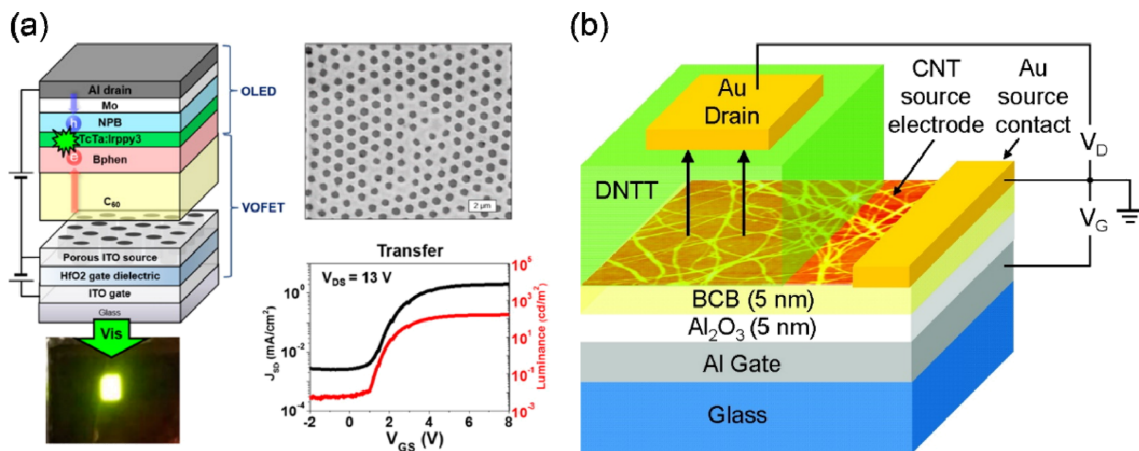


Fig. 6. 3-Dimensional schematic of (a)vertical organic field-effect transistor and (b)carbon nanotube-vertical field-effect transistor.

큰 태양전지의 최대 효율은 32 %이나 현재까지 구현된 최고 성능은 27.6%로 답보 상태에 있다. 전기장 투과 전극 기반의 에너지 변환 효율 극대화 기술은 기존의 태양 전지 성능의 한계를 극복하고 이론적 한계치에 근접하도록 성능을 최적화하는 데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

3.3. 신기능 광전소자 구현

디스플레이, 스마트 조명 등의 활용을 위해 각각의 발광다이오드(LED, light emitting diode)마다 트랜지스터가 내장되어 독립적인 제어가 가능하도록 설계된 발광트랜지스터(LET, light emitting diode + transistor)가 개발되었

다. 발광트랜지스터는 광 소자와 전자 소자의 두가지 기능을 동시에 구현할 수 있고, 전력 소모를 줄이면서 더 정교한 화면을 구현 할 수 있게 된다. 하지만 트랜지스터와 발광다이오드가 수평으로 배열되어 있을 경우, 발광 면적이 줄어들고, 구조가 복잡하여 생산 단가가 높아지게 된다.

이를 해결하기 위해, 홀 패턴을 갖는 전기장 투과 전극을 이용하여 독립적인 제어가 가능한 수직형 다층 박막 발광 소자 연구가 진행되었고, 이를 Fig. 6(a)에서 보여주었다. 이 연구에서는 ITO 금속을 이용하였고, 홀 크기를 최적화 하여 전극을 제작하였다. 외부 전기장을 인가하기 위해 강유전체 산화물(HfO₂)을 이용하여 전계 효과를

가한 결과 on/off ratio가 10^4 까지 향상되었다.¹⁴⁾ Fig. 6(b)는 1D 소재 기반의 전극인 탄소나노튜브 전극 재료를 이용하여 낮은 전압에서도 구동 가능한 수직형 발광트랜지스터 소자를 구현하였고, on/off ratio는 10^5 이상의 성능을 보여 주었다.¹⁵⁾

4. 결 론

본 논문에서는 전기장 투과 전극의 발달 과정과 특성에 대해 설명하고, 이를 활용한 응용 소자의 연구 동향에 대해서 살펴보았다. 비교적 우수한 전기 전도성을 갖고 빛과 전기장이 투과할 수 있는 전기장 투과 전극은 트랜지스터, 태양전지, 발광트랜지스터 등 다양한 소자에 적용되어 성능 및 에너지 변환 효율을 향상시키는 연구가 지속적으로 진행되고 있다. 특히 나노 스케일 패턴이 된 그래핀 메쉬 전극은 전 영역으로 전계 효과를 전달할 수 있기 때문에 전기 전도도의 큰 손실 없이 그래핀의 전기장 투과도 보다 높게 보여주었다. 전기장 투과 전극을 활용한다면, 기존 광전자 소자의 구조와 성능의 한계성을 극복하고, 모바일 전자기기, 미래 에너지원 및 국방/의료 기기 등 다양한 분야에 적용할 수 있을 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 미국 공군 연구소(AFOSR/AOARD, USA)의 지원을 받아 수행된 결과입니다(FA2386-18-1-4110).

References

1. W. H. Baek, M. Choi, T. S. Yoon, H. H. Lee, and Y. S. Kim, "Use of fluorine-doped tin oxide instead of indium tin oxide in highly efficient air-fabricated inverted polymer solar cells", *Appl. Phys. Lett.*, 96, 133506 (2010).
2. B. J. Kim, "Reliability of Metal Electrode for Flexible Electronics", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 20(4), 1 (2013).
3. D. G. Kim, Y. M. Kim, and J. W. Kim, "Recent Trends in Development of Ag Nanowire-based Transparent Electrodes for Flexible-Stretchable Electronics", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 22(1), 7 (2015).
4. J. Y. Kim, B. G. Kim, Y. K. Lee, J. H. Kim, D. H. Woo, S. Y. Kwon, D. G. Lim, and J. H. Park, "Properties of Ga-doped ZnO transparent conducting oxide fabricated on PET substrate by RF magnetron sputtering", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 17(1), 19 (2010).
5. J. H. Kim, M. W. Chon, and S. H. Choa, "Technology of Flexible Transparent Conductive Electrode for Flexible Electronic Devices", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 21(2), 1 (2014).
6. A. J. Ben-Sasson, E. Avnon, E. Ploshnik, O. Globberman, R. Shenhar, G. L. Frey, and N. Tessler, "Patterned electrode vertical field effect transistor fabricated using block copolymer nanotemplates", *Appl. Phys. Lett.*, 95, 213301 (2009).
7. M. G. Kang, M. S. Kim, J. Kim, and L. J. Guo, "Organic Solar Cells Using Nanoimprinted Transparent Metal Electrodes", *Adv. Mater.*, 20, 4408 (2008).
8. S. Kim, S. Ju, J. H. Back, Y. Xuan, P. D. Ye, M. Shim, D. B. Janes, and S. Mohammadi, "Fully Transparent Thin-Film Transistors Based on Aligned Carbon Nanotube Arrays and Indium Tin Oxide Electrodes", *Adv. Mater.*, 21, 564 (2009).
9. W. Regan, S. Byrnes, W. Gannett, O. Ergen, O. Vazquez-Mena, F. Wang, and A. Zettl, "Screening-Engineered Field-Effect Solar Cells", *Nano Lett.*, 12, 4300 (2012).
10. S. H. Kim, J. H. Lee, J. S. Park, M. S. Hwang, H. G. Park, K. J. Choi, and W. I. Park, "Performance optimization in gate-tunable Schottky junction solar cells with a light transparent and electric-field permeable graphene mesh on n-Si", *J. Mater. Chem. C.*, 5, 3183 (2017).
11. C. J. Shih, R. Pfattner, Y. C. Chiu, N. Liu, T. Lei, D. Kong, Y. Kim, H. H. Chou, W. G. Bae, and Z. Bao, "Partially-Screened Field Effect and Selective Carrier Injection at Organic Semiconductor/Graphene Heterointerface", *Nano Lett.*, 15, 7587 (2015).
12. M. K. Petterson, M. G. Lemaitre, Y. Shen, P. Wadhwa, J. Hou, S. V. Vasilyeva, I. I. Kravchenko, and A. G. Rinzler, "On Field-Effect Photovoltaics: Gate Enhancement of the Power Conversion Efficiency in a Nanotube/Silicon-Nanowire Solar Cell", *ACS applied materials & interfaces*, 7(38), 21182 (2015).
13. J. S. Yi, D. H. Lee, W. W. Lee, and W. I. Park, "Direct Synthesis of Graphene Meshes and Semipermanent Electrical Doping", *J. Phys. Chem.*, 4, 2099 (2013).
14. H. Yu, Z. Dong, J. Guo, D. Kim, and F. So, "Vertical Organic Field-Effect Transistors for Integrated Optoelectronic Applications", *ACS applied materials & interfaces*, 8(16), 10430 (2016).
15. M. A. McCarthy, B. Liu, and A. G. Rinzler, "High Current, Low Voltage Carbon Nanotube Enabled Vertical Organic Field Effect Transistors", *Nano Lett.*, 10, 3467 (2010).
16. K. Lopata, R. Thorpe, S. Pistinner, X. Duan, and D. Neuhäuser, "Graphene nanomeshes: Onset of conduction band gaps", *Chem. Phys. Lett.*, 498, 334 (2010).
17. J. Bai, X. Zhong, S. Jiang, Y. Huang, and X. Duan, "Graphene nanomesh", *Nat. Nanotechnol.*, 5, 190 (2010).
18. H. Yang, J. Heo, S. Park, H. J. Song, D. H. Seo, K. E. Byun, P. Kim, I. Yoo, H. J. Chung, and K. Kim, "Graphene Barrier, a Triode Device with a Gate-Controlled Schottky Barrier", *Science*, 336, 1140 (2012).
19. M. A. McCarthy, B. Liu, R. Jayaraman, S. M. Gilbert, D. Y. Kim, F. So, and A. G. Rinzler, "Reorientation of the High Mobility Plane in Pentacene-Based Carbon Nanotube Enabled Vertical Field Effect Transistors", *ACS Nano*, 5, 291 (2011).
20. S. Liu, S. Ho, and F. So, "Novel Patterning Method for Silver Nanowire Electrodes for Thermal-Evaporated Organic Light Emitting Diodes", *ACS applied materials & interfaces*, 8, 9268 (2016).
21. B. Liu, M. A. McCarthy, Y. Yoon, D. Y. Kim, Z. Wu, F. So, P. H. Holloway, J. R. Reynolds, J. Guo, and A. G. Rinzler, "Carbon-Nanotube-Enabled Vertical Field Effect and Light-Emitting Transistors", *Adv. Mater.*, 20, 3605 (2008).
22. X. Miao, S. Tongay, M. K. Petterson, K. Berke, A. G. Rinzler, B. R. Appleton, and A. F. Hebard, "High Efficiency Graphene Solar Cells by Chemical Doping", *Nano Lett.*, 12, 2745 (2012).

23. P. Wadhwa, B. Liu, M. A. McCarthy, Z. Wu, and A. G. Rinzler, "Electronic Junction Control in a Nanotube-Semiconductor Schottky Junction Solar Cell", *Nano Lett.*, 10, 5001 (2010).
24. P. Wadhwa, G. Seol, M. K. Petterson, J. Guo, and A. G. Rinzler, "Electrolyte-Induced Inversion Layer Schottky Junction Solar Cells", *Nano Lett.*, 11, 2419 (2011).
25. X. Yu, L. Yang, Q. Lv, M. Xu, H. Chen, and D. Yang, "The enhanced efficiency of graphene-silicon solar cells by electric field doping", *Nanoscale*, 7, 7072 (2015).
26. L. Yang, X. Yu, W. Hu, X. Wu, Y. Zhao, and D. Yang, "An 8.68% Efficiency Chemically-Doped-Free Graphene-Silicon Solar Cell Using Silver Nanowires Network Buried Contacts", *ACS applied materials & interfaces*, 7(7), 4135 (2015).
27. K. Kim, T. H. Lee, E. J. G. Santos, P. S. Jo, A. Salleo, Y. Nishi, and Z. Bao, "Structural and Electrical Investigation of C60-Graphene Vertical Heterostructures", *ACS Nano*, 9, 5922 (2015).
28. Y. Liu, J. Guo, E. Zhu, P. Wang, V. Gambin, Y. Huang, and X. Duan, "Maximizing the Current Output in Self-Aligned Graphene-InAs-Metal Vertical Transistors", *ACS Nano*, 13, 847 (2019).
29. Y. Yang, X. Yang, X. Zou, S. Wu, D. Wan, A. Cao, L. Liao, Q. Yuan, and X. Duan, "Ultrafine Graphene Nanomesh with Large On/Off Ratio for High-Performance Flexible Biosensors", *Adv. Funct. Mater.*, 27, 1604096 (2017).
30. Y. Song, X. Li, C. Mackin, X. Zhang, W. Fang, T. Palacios, H. Zhu, and J. Kong, "Role of Interfacial Oxide in High-Efficiency Graphene-Silicon Schottky Barrier Solar Cells", *Nano Lett.*, 15, 2104 (2015).
31. O. Vazquez-Mena, J. P. Bosco, O. Ergen, H. I. Rasool, A. Fathalizadeh, M. Tosun, M. Crommie, A. Javey, H. A. Atwater, and A. Zettl, "Performance Enhancement of a Graphene-Zinc Phosphide Solar Cell Using the Electric Field-Effect", *Nano Lett.*, 14, 4280 (2014).



- 이재형(李在馨)
- 한양대학교 신소재공학과
- 2D재료 합성 및 광전자소자
- E-mail: jaehyung119@gmail.com



- 신재혁(申在赫)
- 한양대학교 신소재공학과
- 2D재료 합성 및 광전자소자
- E-mail: 5620tls@naver.com



- 이상일(李商一)
- 한양대학교 신소재공학과
- 2D 재료 합성 및 광전자소자
- E-mail: sang11200@nate.com



- 박원일(朴原一)
- 한양대학교 신소재공학과
- 2D 재료, 나노구조체 합성 및 광전자소자
- E-mail: wipark@hanyang.ac.kr