응용기술 측면에서의 그래핀 노벨상 수상의 의의

DOI: 10.3938/PhiT.19.061

안 중 현

Significance of the Nobel Prize Awarded to Graphene in Application Technology

Jong-Hyun AHN

Graphene has high electrical conductivity and excellent mechanical properties and it is expected to be applied to the new concept of future information appliances such as flexible, stretchable and conformable electronic system because of the other outstanding characteristics. Among them, the recent research on the application of graphene as a transparent electrode has reached near the level of practical application and it is expected to be the future replacement of ITO and available as transformable electrode. Since the first appearance of graphene in 2004, especially, the Nobel Prize in Physics is considered to be the spur of the worldwide graphene research.

서 론

최근 전 세계는 각종 첨단기술의 급속한 발전 및 확산으로 급격한 사회변화와 생활방식의 변화를 경험하고 있으며, 가까운 미래에는 유비쿼터스, 친환경, 정보화라는 변화의 키워드를 중심으로, 사회환경과 제품의 연계를 통한 개인에 대한 서비스의 지능화가 가속되어질 전망이다. 이러한 사회적·산업적 변화 추세를 감안할 때, 미래사회의 정보화기기는 인간에게 편리함을 제공할 수 있도록 가볍고 휴대가 용이한 flexible, stretchable, conformable 제품들이 핵심적인 역할을 할 것으로 예상된다.^[1] 이러한 새로운 개념의 전자소자를 개발하기 위해서는 사용될 소재·소자 모두 높은 변형률에도 자유롭게 구동을 해야 한다. 하지만, 현재 사용되고 있는 대부분의 전자소재들은 단단

하고 부서지기 쉬운 특성들을 가지고 있다. 예를 들어 대표적인 반도체 소재인 실리콘과 투명전극 소재인 산화인듐주석(Indium-Tin-Oxide, ITO)은 1% 정도의 작은 변형률에도 쉽게 부서지는 단점을 가지고 있다. 이 때문에 고변형율에서도 기계적, 전기적 특성을 잘 발휘할 수 있는 반도체, 투명전극 소재 개발은 많은 공학자들과 산업계의 큰 바램이었다. 이런 상황 속에서 2004년 그래핀의 등장은 물리학, 화학 등의 기초과학분야뿐만 아니라, 소재, 전자공학 등의 응용공학분야에 큰 반향을 가져오기에 충분했다.^[2] 전자소자응용분야의 중요한 전환점의 시기에 이번 가임 교수와 노보셀로프 교수의 노벨 물리학상 수상은 전자소재·소자 분야의 패러다임을 바꾸는 중요한 전환점을 제시할 것으로 기대된다. 본 글에서는 이번 그래핀의 노벨 물리학상 수상의 응용기술적 측면에서 그 의미를 살펴보고자 한다.

기존 전자소재 기술의 한계

현 소재 기술별 한계성과 대체 기술로서의 그래핀의 중요성을 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 포스트 실리콘 시대의 그래핀의 등장

1947년 기존 진공관소자의 한계점을 극복할 수 있는 트랜지스터가 발명된 후(1956년 노벨 물리학상), 실리콘 기반의 소자 집적화(2000년 노벨 물리학상) 기술의 발전으로, 전자소자의 고성능화가 이루어지면서 현대의 전자시대가 도래하게 되었다. 그러나 최근 실리콘 기반 반도체 기술이 한계점에 접근함에 따라 기존 실리콘 소재 기반 기술의 한계를 극복할 수 있는 새로운 패러다임의 기술 개발이 절실한 상황이다. 이를 위해서 발열량이 작고 전자이동도가 크면서도 가공이 용이한 새로운 반도체 소재 개발의 필요성이 증대되고 있다. 그래핀은 탄소원자들이 2차원 상에서 sp^2 결합에 의한 단단한 벌집모양의 배열을 이루고 있어 원자 한 층의 두께이면서도 구조적, 화학적으로도 매우 안정하고 뛰어난 열전도도와 전도체로서의

저자약력

안중현 교수는 포스텍 신소재공학과 공학박사(2001)로서 University of Illinois U-C, 재료공학과 Post. Doc.(2004-2008)을 거쳐 현재 성균관대학교 신소재공학부, 성균관과학기술원 조교수(2008-현재)로 재직 중이다. (ahnj@skku.edu)

REFERENCES

- [1] J. -H. Ahn *et al.*, Science **314**, 1754 (2006).
- [2] K. S. Novoselov, *et al.*, Science **306**, 5696 (2004).

특징을 갖고 있다.^[3-5] 기존 반도체 소재의 경우 표면의 비결합 원자들과 결정구조의 결함은 저항을 발생시키고 이는 나노소자 크기와 효율의 한계로 이어진다. 이에 비해 그래핀은 원자 하나의 두께를 가지면서도 상대적으로 표면결함이 적고 양자역학적 구조 특성으로 인해 매우 우수한 전도성을 보인다. 뿐만 아니라 상대적으로 가벼운 원소인 탄소만으로 이루어져 나노패턴을 가공하기가 매우 용이하다. 실리콘 반도체는 고주파 영역에서 상당한 열이 발생하여 안정적으로 작동할 수 있는 속도 범위가 제한되는 반면, 그래핀은 전하인 전공과 전자의 이동시 산란이 거의 발생하지 않아 전하 이동 속도가 빠르며 우수한 열전도로 발열 문제를 해결할 수 있어 밴드갭 엔지니어링을 통해 반도체 특성을 확보할 경우, 실리콘 반도체를 대체할 수 있는 차세대 반도체 재료로 주목 받고 있다. 그래핀은 높은 전하이동도에 비해 밴드갭이 작아 0.4 eV 이상의 밴드갭이 요구되는 디지털 소자 분야보다는 낮은 밴드갭에서도 구동 가능한 RF 아날로그 소자쪽으로의 응용이 용이할 것으로 보인다. 현재 RF 소자의 세계 시장 규모는 연평균 6.2% ('07년 ~ '11년) 성장을 하여 '07년 81억 달러에서 '11년 103억 달러, '16년 160억 달러 규모로 증가할 것으로 예상된다. 우리나라 시장은 세계 시장의 약 4% 수준에 해당하는 것으로 추산되며, 10 GHz 이상의 고성능 RF 소자 시장은 현재 전체 RF 소자 시장의 20% 수준으로 추산된다. 그래핀은 전하이동도가 $200,000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 에 달해 수십 GHz대의 RF 소자는 물론 THz 소자 구현이 가능할 것으로 기대된다.^[6] THz RF 소자는 대용량 데이터 통신을 가능하게 함으로 차세대 통신의 중요한 위치를 차지할 것으로 보인다. 다른 물질에 비해 탁월한 전하이동도를 가진 그래핀은 이 기술의 구현에 가장 적합한 소재로 꼽히고 있다. 그래핀 THz RF 소자로 0.3 THz 미만의 주파수영역에서는 원거리 무선 통신모듈에 사용가능하며 0.3 THz 이상영역에서는 근거리 무선통신에서 대용량의 데이터 전송을 가능케 하여 차량 내 센서들과 중앙처리장치 사이의 또는 IT 기기들간의 빠른 데이터 전송에 활용할 수 있다.

2. 산화물 기반 투명전극 소재의 대체제, 그래핀

현재 대표적으로 사용되고 있는 투명전극인 ITO는 높은 제조 공정 비용 외에도 터치패널이나 플렉서블 디스플레이와 같이 기계적인 충격을 지속적으로 받는 응용분야에 사용할 경우 부서지기 쉬운 특성으로 인해 내구성이 취약한 문제점과 플라즈마 기판과의 접착력, 열팽창 계수의 차이 등 공정상의 문제점으로 인해 플렉서블 디스플레이, 태양전지 등에 응용하기 어려울 뿐만 아니라, 인듐의 고갈로 인하여 향후 전극용 ITO 필름 생산이 불가능한 시점이 가까운 시일 내에 도래할 것으로 예상되어 대체제 개발이 시급한 상황에 처해 있다. 투명전극 재료는

Fig. 1. The sheet resistances of transparent electrode according to its applications.

광학적으로 가시광선 영역에서의 투과율이 80% 이상의 전기광학적 특성을 만족시켜야 하며, 전하를 운반할 수 있는 전하가 충분하고 이들 전하가 쉽게 움직일 수 있는 구조를 가지고 있는 것이 중요하다. 그림 1은 투과도 대비 전도특성에 따른 투명전극의 응용분야를 보여준다. 투명전극은 면저항 $10 \sim 100 \Omega/\text{sq}$ 영역에서 OLED 디스플레이 및 태양전지 등에, $\sim 100 \Omega/\text{sq}$ 영역에서 PDP 광학필터 및 전자차폐제에, $\sim 500 \Omega/\text{sq}$ 인 경우에는 터치스크린 등의 응용분야에서 사용될 수 있다.

최근 ITO를 대체하기 위한 투명전극재료로 전도성 파우더를 포함하고 있는 복합재, 전도성 고분자, 탄소나노튜브 등의 새로운 재료를 이용한 유기투명전극이 연구·개발되고 있으나, 탄소나노튜브의 경우 금속성 나노튜브만을 분리해내는 공정의 어려움과 투명도 대비 전도도가 좋지 않고, 전도성 고분자의 경우 용해도가 낮고 공정이 까다로울 뿐만 아니라, 400 nm 이상 가시광선 파장대의 빛을 흡수하기 때문에 색을 띠고 있어 투과도를 높이기 위하여 박막으로 코팅할 경우 표면저항이 높아지는 단점이 있다. 특히, 2007년 애플사에서 출시된 아이폰은 기존 통화중심의 휴대폰 시장을 정보전달 중심의 스마트폰으로 변화를 가져왔으며, 터치스크린에서도 저항막방식에서 멀티터치가 가능한 정전용량 방식으로 전환시키며 투명전극의 요구 면저항 값을 $400 \Omega/\text{sq}$ 대에서 $150 \Omega/\text{sq}$ 대로 올리며, 지금까지 개발되어오던 투명전극 대체제들의 활용폭을 크게 감소시켰다. 이러한 상황 속에서 최근 몇 년간 고투명도, 저면저항, 고유연성을 함께 갖춘 새로운 개념의 투명전극 소재 개발에 대한 요구가 증대되어 오던 상황이

REFERENCES

- [3] A. K. Geim and P. Kim, Scientific American **298**, 68 (2008).
- [4] K. S. Novoselov *et al.*, Nature **438**, 197 (2005).
- [5] Y. Zhang, J. W. Tan, H. L. Stormer and P. Kim, Nature **438**, 201 (2005).
- [6] K. I. Bolotina *et al.*, Solid State Communications **146**, 351 (2008).

Table 1. Properties comparison of graphene film with ITO for transparent electrodes.

	ITO	Graphene	Remark
History	1907: Invention 1950s~: First generation, Monopolizing market of transparent conducting layer	2004: Discovery Scale up is being performed	Indium (rare-earth material) will not be supplied to market sufficiently
Modulus (GPa)	119	500	Graphene > ITO
Thickness	100 ~ 200 nm	0.34 nm (3 layers)	Graphene > ITO
Transparency	> 90% ($t=100$ nm)	85%	ITO > Graphene
Heat Conductivity (W/mk)	11 ~ 12	5000	Graphene > ITO
Failure Strain	1.15%	> 20%	Graphene > ITO
Hardness	—	2 times stronger than diamond, 20 ~ 300 times stronger than steel	Graphene > ITO
Chemical Resistance	O.K	O.K	Same
Mobility ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)	41.4 ~ 46.4	10,000	Graphene > ITO
Sheet Resistance (Ω/sq)	< 50	280 (Present level)	Touch Screen: 500, E-paper: $10^2 \sim 10^3$
Productivity	In Production	Production technique for scale up is needed	ITO > Graphene

었다. 이러한 중요한 시기에 등장한 그래핀은 불과 6년이란 짧은 기간에 수십 인치 크기의 대면적 합성 기술이 개발되어 면저항값 < 30 Ω/sq , 투명도 > 90% 대를 달성하였으며 특히, 그래핀 필름을 합성 기판에서 분리하여 소자가 구현될 기판으로 전사(transfer printing)하는 방법을 이용하여 고무기판위에 10% 이상의 변형에서도 전기적 특성을 잃지 않는 신축성 투명 전극을 개발하는데 성공하여 최근 발표하였다.^[7,8]

현재까지 개발된 그래핀 필름은 ITO에 비해 산업적 양산성 측면에서 취약한 면이 있으나, 우수한 기계적 특성, 높은 열전도도, 낮은 재료 소모량 등 여러 측면에서 장점들을 가지고 있다. (표 1)

그래핀 필름은 전도성과 생산성을 향상시켜야 하는 과제가 남아있으나, 그래핀의 합성 기술이 빠르게 발전하고 있어, 가까운 시일 내에 터치센서, 태양전지 그리고 우수한 기계적 물성을 이용하여 OLED 디스플레이 등의 플렉서블 전자소자의 투명전극 소재로의 활용이 기대된다. 이번 노벨 물리학상을 계기로 우리나라를 비롯한 미국, 유럽 정부와 산업체의 관심이 증대되어 향후, 그래핀 양산화 기술 개발이 한층 탄력을 받게 될 것으로 전망된다.

3. 기타 응용분야

그래핀은 무게 대비 넓은 표면적을 가지고 있어 초고용량 커패시터, 이차전지의 음극재로의 활용이 기대되며, 강한 기계적 물성을 이용한 향후 고분자 복합체로의 응용이 기대되고 있다. 또한, 그래핀은 He과 같은 작은 기체도 투과시키지 않는 강한 sp^2 결합을 이루고 있어 결합이 적은 그래핀 필름 합성·전사 기술 개발시 OLED 디스플레이 등에 사용될 수 있는 가스배리어 필름으로의 적용이 기대되고 있다.

Fig. 2. A prediction of application field and market for transparent electrode using graphene film.

결론

그래핀은 터치센서, 태양전지 등에 사용되는 기존 투명전극 소재인 ITO의 대체 소재와 높은 전하이동도를 활용하여 초고주파 소자용 반도체로 활용될 가능성이 높으며, 특히 그래핀이 갖고 있는 우수한 기계적 물성을 이용하여 OLED 디스플레이, 태양전지 등 플렉서블 전자소자에 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 그래핀 관련 기술은 세계적으로 시작된 지 6년에 불과하지만, 이번 노벨상 수상을 계기로 그래핀에 대한 세계 각국의 연구 지원확대로 이어져 대면적 합성 기술, 투명전극, 반도체 소자를 비롯한 다양한 전자분야로의 응용 기술 개발이 탄력을 받을 것으로 기대된다.

REFERENCES

- [7] K. S. Kim *et al.*, Nature **457**, 706 (2009).
- [8] S. Bae *et al.*, Nat. Nanotech. **5**, 574 (2010).