

# 그래핀 기반 전자소자 및 광전소자 기술

## Graphene-based Electronic and Optoelectronic Devices

김진태 (J.T. Kim)	그래핀소자창의연구실 선임연구원
김기출 (K.C. Kim)	그래핀소자창의연구실 초빙연구원
유영준 (Y.-J. Yu)	그래핀소자창의연구실 선임연구원
윤두협 (D.H. Youn)	그래핀소자창의연구실 책임연구원
정광호 (K.H. Chung)	그래핀소자창의연구실 선임연구원
최무한 (M.H. Choi)	그래핀소자창의연구실 선임연구원
최춘기 (C.-G. Choi)	그래핀소자창의연구실 실장

탄소 원자가 육각형의 벌집 모양으로 이차원구조체를 이룬 그래핀은 2004년 처음 실험적으로 흑연으로부터 떼어낼 수 있는 방법이 발표되면서 그 존재가 확인되었고 이후 여러 가지 독특하고 우수한 물성들이 속속 발표되면서 많은 연구자들의 주목을 받고 있다. 수많은 그래핀 연구자들은 천연 그래핀뿐만 아니라 대면적의 그래핀을 성장하고 숨겨진 전기적, 광학적 물성을 밝히고 제어하는 기술에 대한 기초 연구로부터 제어된 그래핀의 물성을 이용한 다양한 전자소자 및 광전소자로의 응용 기술에 대해 많은 연구를 진행하고 있다. 본고에서는 최근에 이루어진 그래핀 기반의 전자소자와 광전소자에 관한 연구 동향을 몇 가지 예와 함께 소개하고 ETRI 그래핀소자창의연구실의 연구주제와 앞으로의 연구 방향에 대해 살펴보고자 한다.

### 정보통신 미래원천기술 특집

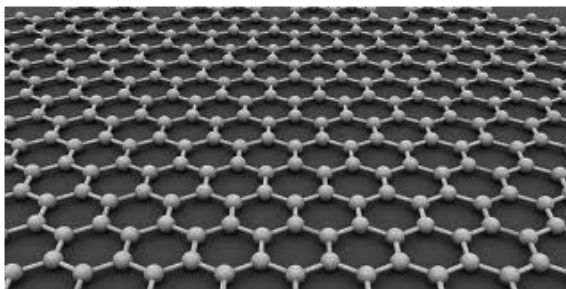
- I. 서론
- II. 그래핀 화학 센서
- III. 그래핀 온도/열 센서
- IV. 그래핀 스핀 소자
- V. 그래핀 광도파로 소자
- VI. 그래핀 능동 메타물질
- VII. 그래핀 전극 LED 소자
- VIII. 결론

## I. 서론

그래핀은 (그림 1)과 같이 탄소 원자가 육각형의 벌집 모양으로 이차원구조체를 이룬 물질이다[1]. 그래핀의 주요한 물리적 특징은 밴드갭(bandgap)이 없는 밴드구조를 가진다는 것이다. 때문에 전도성을 보이고 있으나, 페르미 준위에서 전자의 상태 밀도가 “0”인 반금속(semi-metal) 물질의 특성을 보이고, 도핑 정도에 따라 전하 운반자의 종류 및 밀도를 변화시킬 수 있는 양극성 전도(ambipolar conduction) 특성을 나타낸다. 그래핀의 전자는 질량이 없는 디랙 입자(massless Dirac Fermion)로 정의되며 이는 실리콘 내 전자보다 20배 이상 빠른 전자 이동도를 설명해 준다[2].

그래핀은 독특한 전기적 특성 외에 우수한 광학적, 기계적 특성을 동시에 갖는다. 그래핀의 열전도율은 구리보다 20배 이상 높으며[3], 영률(Young's modulus)은 철에 비하여 5배 크다[4]. 또한, 단일층의 그래핀은 빛을 97% 가까이 투과시킬 정도로 투명하다[5].

그래핀과 관련된 연구들은 그래핀의 본래 성질을 규명하고 분석하는 기초 연구 분야에 집중하고 있으며, 규명된 그래핀의 전기적, 광학적, 기계적 특성을 이용한 응용 소자에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다[6],[7]. 본고에서는 그래핀을 기반으로 하는 전자소자와 광전소자에 관하여 최근에 이루어진 연구의 동향을 몇 가지 예와 함께 소개하고 앞으로의 연구주제에 대해 알아보고자 한다.



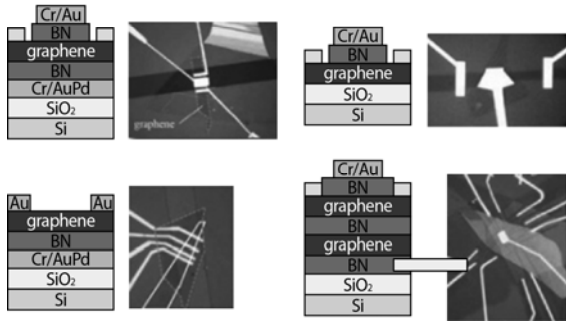
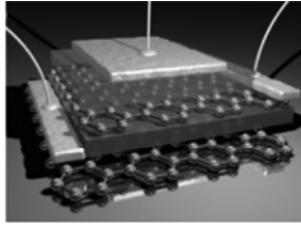
(그림 1) 그래핀의 구조

## II. 그래핀 화학 센서

그래핀 전자소자 응용 분야 중, 외부 분자들과의 화학적 결합을 이용한 센서 분야가 많이 연구되고 있다. 그래핀은 표면에 원하지 않은 잔존물(residual) 혹은 구조적 결함(defect)이 존재할 때 그 부분과 분자와의 결합(molecular functionalization)이 활발히 이루어지기 때문에[8], 완벽한  $sp^2$ 의 결합만이 존재할 때는 최종적으로 모서리에만 존재하는 결함들이 측정 부분으로 이용될 수 있다. 그러나 현실적으로 그래핀 시료를 준비함에 있어 내·외부적으로 구조적 혹은 전기적 결함들이 존재하게 되며 이러한 결함들에 의해 측정하고자 하는 분자와의 결합을 유도할 수 있다.

기존에 사용되는 연구 방법으로는 결함이 처음부터 많은 환원된 산화그래핀(reduced Graphene Oxide: rGO)을 이용함으로 분자들과의 결합이 증가하여 측정 확률을 높이는 방향으로 연구가 활발히 진행되고 있으나, rGO는 낮은 초기 전도도 때문에 전자소자로서의 성능이 저하되는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하며 동시에 센서 성능을 높이기 위해서는 이를 결정짓는 카본(carbon) 구조 내의 결함 부분의 위치 및 정량적인 조절이 필요하다. 이를 위해서 기본적으로 높은 성능의 그래핀 소자를 준비한 후 이 소자에서부터 원하는 부분과 측정하고자 하는 분자와의 결합을 유도시키는 센서 소자 구현이 필요하다.

최근, (그림 2)와 같이 그래핀의 성능을 획기적으로 높이기 위한 새로운 절연층을 접목한 실험이 활발히 진행되고 있다[9],[10]. 그 절연층은 헥사고날 보론 나이트라이드(hexagonal Boron Nitride: h-BN)로서 그래핀과 같은 판상 구조이며 헥사고날 구조이기 때문에 그래핀과의 구조적인 차이도 거의 없는 장점이 있다. ETRI 그래핀소자창의연구실에서는 현재 이러한 h-BN 절연층 위에 그래핀을 올려서 높은 성능의 트랜지스터(Field Effect Transistor: FET)를 구현한 후 원하는 부분에 분



(그림 2) 핵사고날 보론 나이트라이드 절연층과 그래핀을 적용하여 구현한 여러 가지 구조의 이차원 트랜지스터

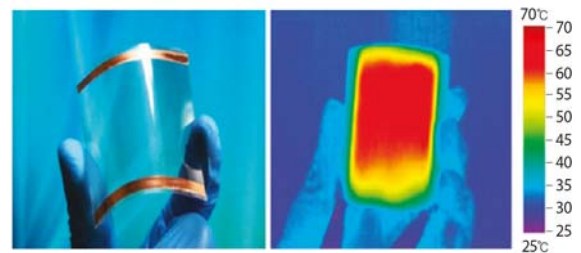
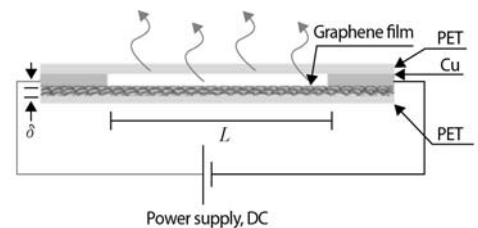
자와의 결합을 통한 센서 응용을 우선 목표로 하고 있다. 빠른 시일 내로는 뛰어난 전도도 변화의 그래핀 소자를 h-BN과 접목하여 만든 후 피할 수 없는 결합인 모서리 부분만을 분자와 반응하는 센서 구조를 통한 성능 향상에 주목하고 있으며, 장기적으로는 센서뿐만이 아닌 이러한 이차원 물질들의 적층(stack)을 통한 새로운 응용 분야에서 필요로 하는 신개념 이차원 전자소자의 구현이 가능할 것이다.

### III. 그래핀 온도/열 센서

그래핀의 또 하나의 응용 예로서, 그래핀의 높은 열전도도, 투명도, 유연성 특성을 적용한 고효율 투명 유연 히터 개발이 이루어지고 있다. 현재 roll-to-roll 기반 30인치 수준의 고품질 그래핀 필름 대량생산 기술이 개발되어[11], 그래핀의 산업화를 앞당기고 있으며, 그 응용으로써 자동차 창문, 거울, 디스플레이 등의 성애와 이슬 제거에 이용될 수 있는 스마트 윈도우형 투명 히터

개발이 주목받고 있다. 기존에 투명 히터로 이용되고 있는 ITO(Indium Tin Oxide)는 낮은 유연성, 내구성, 느린 열응답, 복잡한 공정 및 높은 재료-제작비 등의 문제가 있으나, 그래핀 히터는 이를 극복할 수 있는 것으로 판단되고 있다. 서울대-성균관대 연구팀은 PET (Polyethylene-terephthalate) 기판에 CVD(Chemical Vapor Deposition) 성장된 그래핀을 다중 전사시켜서 약 90% 이상의 투명도와 50 Ohm/sq 수준의 면저항을 가지고, 빠른 열응답, 높은 온도 및 균일도를 보유한 투명 히터를 (그림 3)과 같이 개발하였다[12]. 앞으로 그래핀 투명 히터 연구는, 저전력화, 열응답 초고속화, 투명도 향상, 저가 패터닝 공정 등 제작 공정의 단순화, 그래핀 열전달의 이론적 규명 및 히터의 기타 부품 적용 등이 필요할 것으로 예상된다.

그래핀의 높은 열전도도[3]로 인해 열전달뿐만 아니라 열 흐름을 측정하는 센서로도 응용이 시도되고 있다. 기존에 박리된 그래파이트 혹은 단일층 및 다층 그래핀에서 온도 변화에 따른 선형적 저항 변화가 보고되었으며[13], 최근에 S. Sahoo 외[14]는 화학적으로 합성된 환원된 산화그래핀(rGO)이 온도에 따라 선형적인 저항 변화가 있는 점을 이용하여 기존 백금 열 센서에 비해



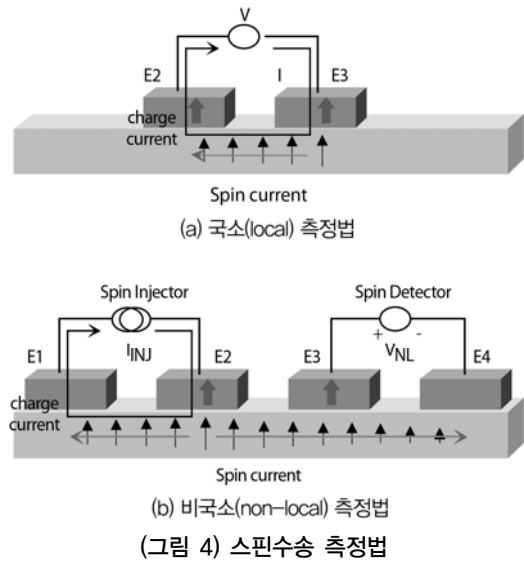
(그림 3) 그래핀 기반 투명 유연 히터

매우 빠른 응답 및 민감도를 가지는 온도 센서를 개발하였다. 또한, 그래핀의 열 흡수에 의한 전기저항 변화를 측정하는 bolometer로의 응용도 시도되고 있다. 그래핀을 활용한 온도/열 센서로의 개발은 아직 초기단계에 있으며, 기존 온도 센서에서 구현하지 못하거나 새로운 특성을 가지는 센서를 구현하는 연구가 필요할 것으로 예상된다.

#### IV. 그래핀 스핀소자

스핀전자소자는 전자의 스핀 자유도를 이용하여 정보를 저장하거나 로직을 구동하여 전력소모를 줄이고 데이터 처리속도를 높이고, 집적도를 높이고자 하는 응용소자를 가리킨다. 스핀전자소자에서의 스핀 주입과 수송(transport) 현상은 다양한 금속, 반도체, 또는 탄소 기반의 소재에서 관찰되어왔다[15],[16]. 전자의 스핀 방향에 영향을 주는 내부적인 요인으로는 스핀-궤도 상호작용(spin-orbit interaction)과 원자의 핵스핀(nuclear spin)과의 초미세 상호작용(hyperfine coupling)이 있는데, 탄소 기반의 소재는 스핀-궤도 상호작용과 핵스핀과의 상호작용이 작으므로 상대적으로 긴 스핀 수명(spin lifetime)을 가져 이상적인 스핀전자 재료로 기대되고 있다[17]. 특히 최근에 행해진 일련의 실험을 통해 자성물질로부터 단일층 그래핀에 주입된 스핀이 상온에서 수 마이크로미터 이상의 먼 거리까지 전달될 수 있다는 것이 밝혀지면서 단일층 그래핀을 기반으로 하는 스핀전자소자의 등장에 대한 기대감이 커지고 있다[18],[19].

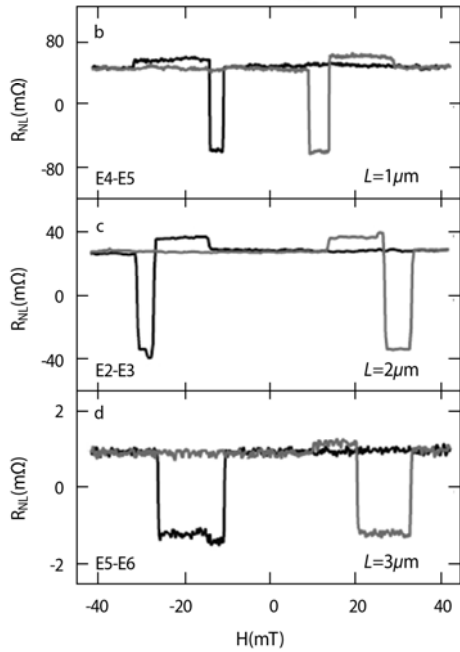
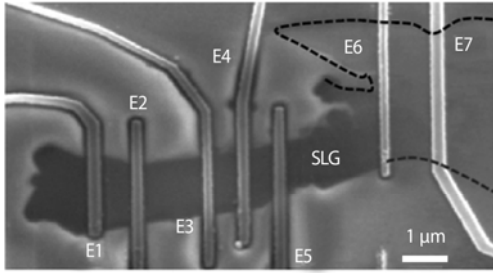
스핀수송 측정은 일반적으로 (그림 4a)와 같은 전통적인 “국소(local)” 측정법과 (그림 4b)와 같은 “비국소(non-local)” 측정법으로 측정한다. 국소 측정법에서는 스핀분극된 전자가 강자성체 전극으로부터 주입되어 그래핀을 가로질러 수송되며, 두 강자성체 전극의 자화 정



렬 방향(평행 또는 반평행)에 따른 저항의 차이로 검출한다. 비국소 측정법에서는 4개의 강자성체 전극을 사용한다. 스핀 검출은 E3와 E4 강자성체 전극 사이의 전압을 측정하여 검출한다(그림 4b 참조). 이때 전압 검출자가 전류 루프 밖에 놓여 있기 때문에 비국소 측정법이라고 부른다. E2 전극에서의 스핀 주입 후 스핀은 E2에서 E1 방향과 E3 방향 양쪽으로 모두 확산하여 간다.

(그림 5)는 HOPG(Highly Oriented Pyrolytic Graphite)에서 기계적으로 박리된 단일층 그래핀과 Co 전극을 이용하여 비국소 측정법으로 스핀수송을 상온에서 측정한 결과이다. 전극 간의 거리가 멀어질수록 비국소 자기저항은 감소하였다. Co 전극 간의 거리가  $1\mu\text{m}$ 일 때 비국소 자기저항은  $100\text{m}\Omega$ 였으며, Co 전극 간의 거리가  $3\mu\text{m}$ 일 때 비국소 자기저항은  $2\text{m}\Omega$ 으로 감소하였다. 현재 이러한 그래핀 스핀전자소자에서의 스핀분극은 약 30% 정도인 것으로 확인되었다[19].

그래핀 스핀전자소자의 경우, 연구는 아직 초기단계이며 향후 연구 방향은 i) 스핀산란에 의한 스핀 완화기구(spin relaxation mechanism) 규명, ii) 자성 나노입자 등을 활용한 스핀 주입 증진(enhancement), iii) 그래핀 나노리본 등을 이용한 100% 스핀분극 구현, iv) 그래핀



(그림 5) 7개의 Co 전극(전극 간 거리 다름)을 갖고 있는 단일층 그래핀 스핀밸브 소자 및 비국소 자기저항 측정 곡선(상온)

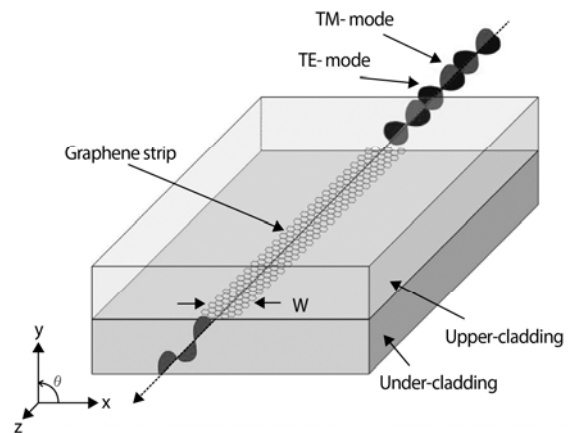
에 자성원자 도핑에 따른 스핀 의존 특성 규명, v) 그래핀 양자점을 이용한 스핀 큐비트(qubits) 구현 및 스핀 로직 소자 구현 등 다양한 연구가 진행될 것으로 예상된다.

## V. 그래핀 광도파로 소자

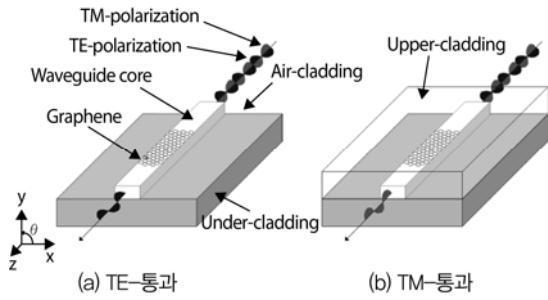
금속과 유전체 경계면에서 여기되는 표면 플라즈몬 폴라리톤(Surface Plasmon Polariton: SPP)을 이용하여 금속 기반의 플라즈모닉 광도파로 소자들이 개발되고 있다[20]. SPP는 금속 내 자유 전자의 집단 여기

(collective excitation)와 전자기파의 결합에 의해 형성되고 금속-유전체 경계면을 따라 진행한다. 금속과 같이 전도성을 갖는 그래핀도 플라즈모닉 광도파로로 응용할 수 있다. 그래핀의 자유 전하 밀도는 화학적 도핑, 게이트-바이어스(gate-bias) 등의 방법으로 용이하게 변화시킬 수 있으므로 그 응용성이 금속 기반의 플라즈모닉 광도파로보다 월등하다.

(그림 6)과 같이 화학기상증착(CVD)법을 통해 성장된 그래핀을 고분자 하부 클래드에 옮기고, 폭이 수  $\mu\text{m}$  인 그래핀 스트립을 형성한 후, 하부 클래드와 동일한 물질로 상부 클래드를 형성하면 그래핀 플라즈몬 광도파로가 완성된다[21]. 제작된 그래핀 플라즈몬 광도파로는 금속 기반의 플라즈몬 광도파로와 같이 TM-모드의 광신호를 전송할 수 있다. TM-모드와 TE-모드 간의 소광비(extinction ratio)는 약 20dB이다. 금속선의 경우와 유사하게 그래핀 플라즈몬 광도파로는 그래핀 스트립의 선폭이 줄어들수록 도파손실은 감소하고 결합 손실은 증가한다. 이는 선폭이 좁은 그래핀 스트립이 가이드 모드의 필드를 약하게 구속하기 때문이다. 6mm 길이의 그래핀 플라즈몬 광도파로를 통해 2.5Gbps급 광통신 신호를 성공적으로 전송함으로써 그래핀 기반의 광도파로의 초고속 광신호의 전송 능력을 확인하였다 [21].



(그림 6) 그래핀 기반의 플라즈몬 광도파로 개념도



(그림 7) 그래핀 기반의 평면형 광도파로형 편광기 구조

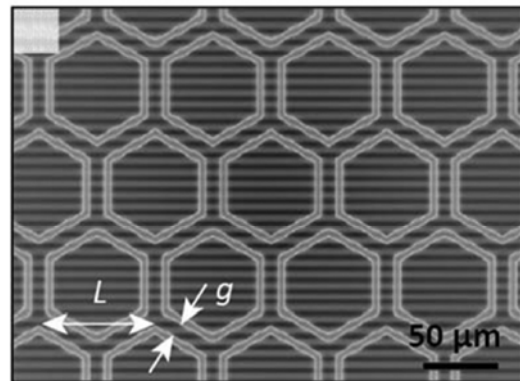
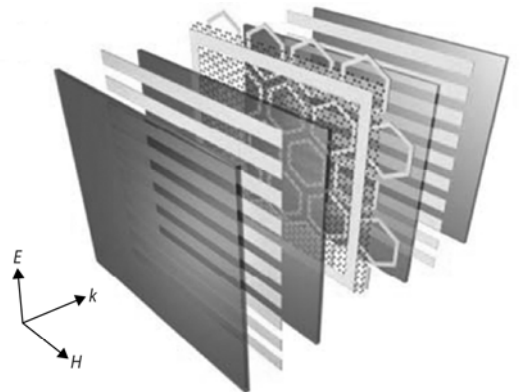
그래핀의 화학 포텐셜을 변화시키면 TE-모드 또는 TM-모드의 광신호를 선택적으로 그래핀 스트립을 통해 도파시킬 수 있다[22],[23]. 이러한 특성을 이용하여 그래핀 기반의 광섬유 편광기가 개발되었다 [24]. 그러나 광섬유 기반의 광소자는 평면 집적형 광소자에 직접 적용하기 어려우므로 그래핀 기반 편광기를 평면형 고분자 광도파로를 이용하여 제작하고 그 동작 특성을 측정하였다. (그림 7a)와 같이 정사각형 단면을 갖는 고분자 광도파로를 제작하고 그 위에 그래핀을 형성하면, 10dB의 편광 소멸비를 갖는 TE-모드를 통과시키는 편광기를 제작할 수 있다[25]. 만약, (그림 7b)와 같이 제작된 광도파로형 그래핀 편광기의 상부에 클래드를 형성하면 화학적으로 도핑된 그래핀의 화학 포텐셜이 증가하여 그래핀-유전체 경계면에서 TM-편광 표면파가 형성된다. 따라서, 상부 클래드가 있는 평면형 그래핀 편광기는 TM-모드 통과 편광기로 동작한다. 그래핀 기반의 플라즈몬 광도파로 소자는 유연소자로서의 구현이 가능하므로, 향후 그래핀 기반의 광전집적회로 시스템 구현을 앞당길 수 있을 것으로 예상된다.

## VI. 그래핀 능동 메타물질

Terahertz파 영역에서 능동적으로 메타물질의 투과율이나 굴절률과 같은 광학적 성질을 바꾸고자 하는 시도로 상전이[26] 혹은 반도체 기반으로 연구가 되어 왔다

[27]. 이 중에서도 고속동작이 가능하여 관심의 대상이 된 반도체 기반 active metamaterial의 원리는 메타분자의 gap 주변에 gate를 형성하여 바이어스 전압을 인가하여 공핍 영역을 만들고 이 영역의 크기를 조절하여 메타물질의 투과율을 조절하였다.

또한 single/multi layer 그래핀층을 메타물질의 기반 물질로 활용하여 메타물질의 광학적 특성을 조절하는 연구가 진행되고 있다. 능동형 메타물질의 동작 원리는 인가된 gate 전압에 따라 그래핀의 페르미 준위가 변화하고 이에 따라 그래핀의 전도도가 바뀌는 성질을 메타물질의 광특성 제어에 활용하는 것이다. 그래핀 단독으로는 광학적 투과율을 변화시킬 수 있는 폭은 수 %에 불과하다는 한계를 가지고 있다[28]. 따라서 그래핀층을 메타물질의 기반층으로 사용함으로써 메타물질과 그래핀을 결합시켜 상호작용하게 함으로써 인가된 gate



(그림 8) 그래핀 기반 능동 메타물질

전압에 의하여 변하는 물질의 투과율 변화를 50% 이상으로 끌어 올리는 것이 가능하며, 인가 전압에 따른 투과율의 변화와 더불어 굴절률 변화에 따른 위상의 변화도 관측하여 30° 이상의 변화율을 얻을 수 있다[29].

능동형 그래핀 메타물질의 기본적인 구조는 (그림 8)과 같다. 특정 파장(1THz)에서 공명을 가지는 메타분자에 그래핀층을 결합시키고 그 위아래 쪽으로 전기장을 인가할 수 있는 EOT 전극을 설치하였다. 따라서 본 그래핀 메타물질 소자는 고속 terahertz파 무선 통신용 변조기 혹은 스위칭 소자의 비약적 발전을 가져올 것으로 기대된다.

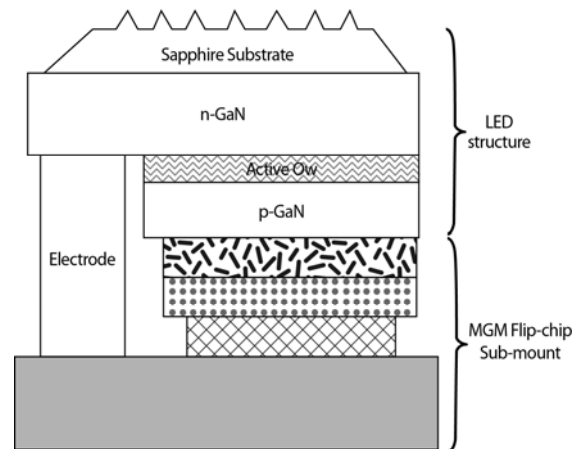
## VII. 그래핀 전극 LED 소자

최근 LED(Light Emitting Diode) 연구에 대한 다양한 시도가 보고되고 있다. 한국과학기술연구원(KIST)에서는 산화아연에 그래핀을 덧씌운 결과 산화아연의 높은 에너지 띠에 존재하던 전자가 그래핀의 낮은 에너지 쪽으로 빠르게 이동하면서 기존에는 보이지 않던 청색 빛이 나타나는 현상을 이용하여, 에너지를 받으면 주황색을 내는 반도체 피닷(PEDOT)을 양극 전극과 음극 전극 사이에 끼워 넣어 백색 빛을 내는 LED를 구현하였다. 또한 서울대학교 연구팀은 산소알갱이로 그래핀 표면을 오돌토돌하게 만든 후, 그 위에 산화아연을 얇게 증착한 후에 그 위에 고품질의 질화물 반도체 박막을 성장하는 기술을 구현함으로써, 청-자색 파장의 빛을 내는 LED를 구현하였다.

ITO 전극은 LED와 디스플레이용 전극으로 현재 가장 널리 사용되지만, 값이 비싸고 자외선 영역에서 투과율이 급격히 떨어지는 단점이 있다. 그래핀은 투과율이 자외선 영역에서 80% 이상으로 매우 높고, 열전도 효율이 좋아서 LED의 구동 온도를 낮추는 효과를 가지기 때문에 최근 활발하게 연구가 이루어지고 있다[30]. 그래

핀 투명전극을 사용한 고효율 UV LED 제작을 위해서는 몇 가지 해결해야 할 문제점이 있다. 첫째는, 그래핀과 접촉되는 p-GaN층의 work function이 각각 4.5eV와 7.5eV로서, 두 층 사이에는 커다란 potential barrier가 존재하여 Schottky contact 구조를 가지기 때문에 LED 구동을 위한 전류 유입이 매우 어렵다. 둘째는, LED 소자를 제작하기 위한 photolithography 공정에서 사용되는 PR(Photo Resist)과 그래핀 표면이 열-처리 시 강한 bonding을 형성하여, 소자 패턴 제작 후 남은 PR을 제거하는 과정에서 그래핀과 같이 붙어서 떨어져 나가버리는 그래핀 이탈현상이 발생한다. 이러한 그래핀 이탈현상은 그래핀 소재 기반의 소자를 산업화하는데 있어서 매우 큰 장애 요인으로 알려져 있다[31].

이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 (그림 9)에서와 같이 그래핀과 p-GaN 사이에 금속-메시 구조를 가지는 ohmic 전극층을 도입하여, LED의 구동 전류 값을 낮추는 연구는 연구가 필요하며, 아울러 전도성 용액을 일정한 크기를 가지는 노즐을 통하여 분사하여 photolithography 공정 없이 기판 위에 바로 원하는 그래핀 소자 패턴을 구현하는 전기방사 방식의 직접인쇄 방식 [32]을 도입함으로써, 그래핀 이탈 현상을 제거한 고효율 LED 제작 연구가 필요할 것이다.



(그림 9) 그래핀 투명전극 기반 LED 구성도

## Ⅷ. 결론

원자 두께의 탄소 2차원 구조물이 존재할 수 있다는 것이 2004년 실험적으로 증명된 후 지금까지 10년이 안 되는 매우 짧은 기간 동안 수많은 연구자들은 그래핀과 관련된 셀 수 없이 많은 연구결과들을 발표하고 있다. 그 연구 내용들은 그래핀의 독특하고 다양한 전기적, 광학적, 기계적 특성과 관련된 기초연구에서부터 그래핀을 응용한 전기소자 및 광전소자 개발과 같은 응용 연구까지 폭넓은 학문 분야를 포괄하고 있다.

지속적인 그래핀의 기초 연구와 응용 기술 연구는 미래의 과학기술 패러다임과 사회문화 패러다임을 동시에 바꿀 수 있는 플렉시블 메모리, 초고속 트랜지스터, 플렉시블 태양전지, 유기 발광소자, 유연 터치스크린, 고효율 광검출기, 광레이저, 플렉시블 광전집적회로 시스템 등 다양한 신개념의 전자소자 및 광전소자를 탄생시킬 것이다.

### 용어해설

**그래핀(Graphene)** 탄소로만 이루어진 동소체로서 2차원상에서 벌집 모양의 배열을 가진 원자 한 층을 이야기하며 현존하는 물질 중 전기적, 기계적, 열적 특성 등이 가장 우수하다고 알려져 있음.

## 약어 정리

CVD	Chemical Vapor Deposition
FET	Field Effect Transistor
h-BN	hexagonal Boron Nitride
HOPG	Highly Oriented Pyrolytic Graphite
ITO	Indium Tin Oxide
LED	Light Emitting Diode
PET	Polyethylene-terephthalate
PR	Photo Resist
rGO	Reduced Graphene Oxide
SPP	Surface Plasmon Polariton

## 참고문헌

- [1] A.H.C. Neto et al., "The Electronic Properties of Graphene," *Rev. Mod. Phys.*, vol. 81, no. 1, 2009, pp. 109-162.
- [2] K.I. Bolotin et al., "Ultrahigh Electron Mobility in Suspended Graphene," *Solid State Commun.*, vol. 146, 2008, pp. 351-355.
- [3] A.A. Balandin et al., "Superior Thermal Conductivity of Single-layer Graphene," *Nano Lett.*, vol. 8, no. 3, 2008, pp. 902-907.
- [4] C. Lee et al., "Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene," *Sci.*, vol. 321, no. 5887, 2008, pp. 385-388.
- [5] R.R. Nair et al., "Fine Structure Constant Defines Visual Transparency of Graphene," *Sci.*, vol. 320, no. 5881, 2008, p. 1308.
- [6] A.K. Geim and K.S. Novoselov, "The Rise of Graphene," *Nat. Mater.*, vol. 6, 2007, pp. 183-191.
- [7] F. Bonaccorso et al., "Graphene Photonics and Optoelectronics," *Nat. Photon.*, vol. 4, 2010, pp. 611-622.
- [8] Y. Dan et al., "Intrinsic Response of Graphene Vapor Sensors," *Nano Lett.*, vol. 9, no. 4, 2009, pp. 1472-1475.
- [9] C. Dean et al., "Boron Nitride Substrates for High-Quality Graphene Electronics," *Nat. Nanotechnol.*, vol. 5, 2010, pp. 722-726
- [10] C. Deana et al., "Graphene Based Heterostructures," *Solid State Commun.*, vol. 152, no. 15, 2012, pp. 1275-1282.
- [11] S. Bae et al., "Roll-to-roll Production of 30-inch Graphene Films for Transparent Electrodes," *Nat. Nanotechnol.*, vol. 5, 2010, pp. 574-578.
- [12] J. Kang et al., "High-Performance Graphene-Based Transparent Flexible Heaters," *Nano Lett.*, vol. 11, no. 12, 2011, pp. 5154-5158.
- [13] Q. Shao et al., "High-temperature Quenching of Electrical Resistance in Grapheme Interconnects," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 92, no. 20, 2008, pp. 202108-1-202108-3.
- [14] S. Sahoo et al., "Reduced Graphene Oxide as Ultra Fast Temperature Sensor," arXiv preprint: 1204.1928v1, 2012.
- [15] C. Chappert, A. Fert, and F.N. Van Dau, "The Emergence of Spin Electronics in Data Storage," *Nat. Mater.*, vol. 6, no. 11, 2007, pp. 813-823.
- [16] L.E. Hueso et al., "Transformation of Spin Information



- into Large Electrical Signals Using Carbon Nanotubes,” *Nat.*, vol. 445, 2007, pp. 410–413.
- [17] B. Trauzettel et al., “Spin Qubits in Graphene Quantum Dots,” *Nat. Phys.*, vol. 3, 2007, pp. 192–196.
- [18] N. Tombros et al., “Electronic Spin Transport and Spin Precession in Single Graphene Layers at Room Temperature,” *Nat.*, vol. 448, no. 7153, 2007, pp. 571–574.
- [19] W. Han et al., “Spin Transport and Relaxation in Graphene” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 324, no. 4, 2012, pp. 369–381.
- [20] P. Berini, “Long-range Surface Plasmon Polaritons,” *Adv. Opt. Photon.*, vol. 1, 2009, pp. 484–588.
- [21] J.T. Kim and S.-Y. Choi, “Graphene-based Plasmonic Waveguides for Photonic Integrated Circuits,” *Opt. Express*, vol. 19, no. 24, 2011, pp. 24557–24562.
- [22] S.A. Mikhailov and K. Ziegler, “New Electromagnetic Mode in Graphene,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 99, 2007, p. 016803-1-016803-4.
- [23] G.W. Hanson, “Dyadic Green’s Functions and Guided Surface Waves for a Surface Conductivity Model of Graphene,” *J. Appl. Phys.*, vol. 103, 2008, pp. 064302-1-064302-8.
- [24] Q. Bao et al., “Broadband Graphene Polarizer,” *Nat. Photon.*, vol. 5, 2011, pp. 411–415.
- [25] J.T. Kim and C.-G. Choi, “Graphene-based Polymer Waveguide Polarizer,” *Opt. Express*, vol. 20, no. 4, 2012, pp. 3556–3562.
- [26] T. Driscoll et al., “Memory Metamaterials,” *Sci.*, vol. 325, no. 5947, 2009, pp. 1518–1521.
- [27] H.-T. Chen et al., “Active Terahertz Metamaterial Devices,” *Nat.*, vol. 444, 2006, pp. 597–600.
- [28] L. Ju et al., “Graphene Plasmonics for Tunable Terahertz Metamaterials,” *Nat. Nanotechnol.*, vol. 6, 2011, pp. 630–634.
- [29] S.H. Lee et al., “Switching Terahertz Waves with Gate-controlled Active Graphene Metamaterials,” arXiv: 1203.0743, 2012.
- [30] B.-J. Kim et al., “Large-area Transparent Conductive Few-layer Graphene Electrode in GaN-based Ultraviolet Light-emitting Diodes,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 99, 2011, pp. 143101- 143103.
- [31] Y.-C. Lin et al., “Graphene Annealing: How Clean Can It Be?,” *Nano Lett.*, vol. 12, no. 1, 2012, pp. 414–419.
- [32] D.-H. Youn et al., “Electrohydrodynamic Micropatterning of Silver Ink Using Near-field Electrohydrodynamic Jet Printing with Tilted-outlet Nozzle,” *Appl. Phys. A*, vol. 96, no. 4, 2009, pp. 933–938