

그래핀 전자소자 및 광소자 응용

최홍규 · 김종윤 · 김재현 · 최춘기 · 최성울

1. 서론

2004년 흑연으로부터 그래핀을 떼어내는 방법이 발견된 이후, 그 동안 예측되었던 특성들이 실험을 통해 발견되면서 그래핀은 많은 과학자들의 주목을 이끌었고 다양한 분야에서 폭발적인 연구 성과를 나타내고 있다. 탄소 단원자층으로 이루어진 그래핀은 페르미 준위 부근에서 선형적인 에너지-운동량 분산 관계(linear energy-momentum dispersion)를 가지고, 밴드갭이 없는 전도체이다. 상온에서의 캐리어 이동도는 $200,000 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 이상으로 실리콘보다 약 100배 이상 높을 뿐 아니라, 광대역 흡수 특성(wide-band absorption), 높은 열전도도 등 전자소자 또는 광소자에 활용될 수 있는 우수한 특성을 가진다. 즉, 전

자의 속도를 향상시킬 수 있다는 것은 저전력에 더욱 많은 정보를 프로세싱할 수 있고, 스위칭 속도 또한 향상할 수 있다는 이야기인 것이며, 덧붙여 실리콘 반도체는 고주파 영역에서 상당한 열이 발생하여 안정적으로 작동할 수 있는 속도가 제한되는 반면에 그래핀은 전하의 이동 시 산란이 거의 발생하지 않아 이동속도뿐만 아니라 우수한 열전도도로 발열문제 또한 해결 가능하다는 것이다.¹

이러한 특성은 그래핀을 포스트 실리콘이라 부르며 기존 전자소자의 기술적 한계를 극복할 수 있을 것이라는 전망을 불러 일으키고 있다. 이는 실리콘 트랜지스터가 발명된 후 기존의 진공관을 빠르게 대체하면서 실리콘 기반의 집적회로 기술이 우리의 생활을 편리하고 풍부하게 만들어 주고 있지만 기술적으로 그 한계점에 이르고 있기 때문에 새로운

최홍규

2000~2007 한국해양대학교 전기전자공학부(공학사)
2007~2009 한국해양대학교 전기전자공학과(공학석사)
2009~현재 한국전자통신연구원 연구연수생
2009~현재 UST 차세대소자공학과(박사과정)

김종윤

2000~2006 대전대학교 화학과(학사)
2006~2008 한양대학교 화학과 분석화학전공(이학석사)
2008~현재 한양대학교 화학과 분석화학전공(박사과정)
한국전자통신연구원 위촉연구원

김재현

2003~2011 광운대학교 화학공학과(학사)
2011~현재 한국전자통신연구원 연구연수생
2011~현재 UST 차세대소자공학과(석사과정)

최춘기

1981~1987 성균관대학교 금속공학과(공학사)
1990~1992 (프) U. Louis Pasteur de Strasbourg I, 기계공학과 재료전공(D.E.A)
1992~1996 (프) U. d'ORLEANS 물리학과 응용물리전공(이학박사)
2006~2006 University of Cambridge, Visiting Scholar
1996~현재 한국전자통신연구원 책임연구원
2007~현재 UST 차세대소자공학과 교수
2010~현재 한국연구재단 나노융합단 전문위원

최성울

1987~1991 KAIST 화학과(이학사)
1992~1994 KAIST 화학과 물리화학전공(이학석사)
1994~1998 KAIST 화학과 물리화학전공(이학박사)
1998~현재 한국전자통신연구원 그래핀소자창의연구실 실장/책임연구원
2006~2006 University of Cambridge, Visiting Scholar
2009~현재 UST 차세대소자공학과 교수

최홍규



김종윤



김재현



최춘기



최성울



Electronics and Optoelectronics Applications of Graphene

한국전자통신연구원 그래핀소자창의연구실(HongKyw Choi, Jong Yun Kim, Jae Hyeon Kim, Choon-Gi Choi, and Sung-Yool Choi, Creative Research Center for Graphene Electronics, Electronics and Telecommunications Research Institute, 218 Gajeongno, Yuseong-gu, Daejeon 305-700, Korea)

과학기술연합대학원대학교 차세대소자공학전공(HongKyw Choi, Jae Hyeon Kim, Choon-Gi Choi, and Sung-Yool Choi, Department of Advanced Device Technology, University of Science and Technology, 217 Gajeongno, Yuseong-gu, Daejeon 305-350, Korea)
e-mail: sychoi@etri.re.kr

기술의 출현에 대한 기대감에 기인한다.² 따라서 현 시점에서 그래핀을 활용한 다양한 소자 응용 기술을 정리하여 향후 그래핀 연구 방향을 가늠해 보는 것은 상당히 의미 있는 일일 것이다. 본 특집에서는 그래핀의 여러 우수한 물성을 활용한 전자소자 및 광소자 응용기술 동향에 대해 정리하고자 한다. 특히 다양한 전자소자 중 그래핀 트랜지스터와 그래핀 소재 기반의 메모리 소자 응용 기술, 그래핀의 광대역 흡수 특성을 활용한 광소자 기술을 소개하고자 한다.

2. 그래핀 트랜지스터

그래핀의 전계효과 트랜지스터 특성은 2010년 노벨 물리학상을 받은 영국 맨체스터 대학의 Novoselov와 Geim교수에 의해 2005년 “Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene”가 Nature지에 발표되었고 **그림 1**과 같이 게이트 전압에 의해 전도도가 선형적으로 증가하는 소자 특성을 보여주어 전계효과 트랜지스터 특성을 확인할 수 있었다. 이후 그래핀을 이용한 트랜지스터 소자에 대한 많은 연구가 진행되었고 이로 인해 고속소자로서의 활용에 걸림돌이 되었던 zero-band gap(전자신호를 증폭하거나 바꾸는 역할을 하지 못함), 잡음문제 등에 대한 문제해결과 고속화의 가속이라는 놀라운 결과를 나타내었다. 이에 대표적인 성과 몇 가지에 대해 알아보하고자 한다.

2008년 IBM의 연구원들이 **그림 2**와 같이 그래핀을 이층으로 쌓아 올려 트랜지스터의 성능을 획기적으로 향상시키는 방법에 대해 발표를 하였다. 그래핀을 이용해 만들어진 디바이스는 크기가 점점 줄어들며 따라 잡음이 커지는 문제가 생기게 되는데, 이는 디바이스 근처에 있는 전하 입자들이 그래핀을 통해 흐르는 전류에 영향을 주어 생산된 신호를 편향시켜 왜곡하기 때문이다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 제안된 두 층의 그래핀을 쌓아 만든 트랜지스터는 두 개의 층에 흐르는 전류가 한 조가 되어 흐르게 하고, 각각의 전자가 쌍으로 이루어져 신호가 편향되는 것을 막아주어 한 층의 그래핀 트랜지스터의 잡음보다 10배

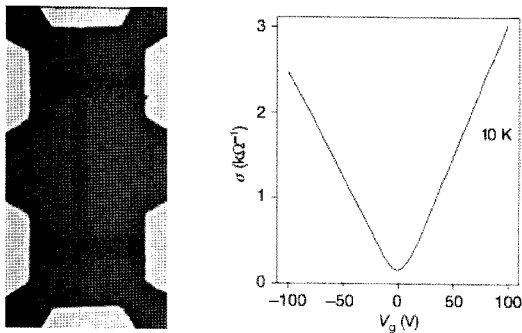


그림 1. 그래핀의 전계효과를 보기 위한 트랜지스터 구조와 소자 특성.³

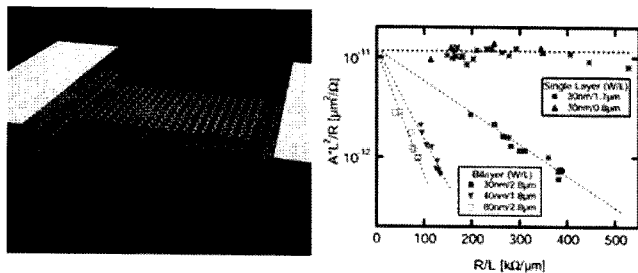


그림 2. 잡음 특성 개선을 위한 2층 구조의 그래핀 트랜지스터.⁴

나 줄이는 놀라운 결과를 가져왔다.⁴

그래핀을 트랜지스터 등의 고속소자로 응용함에 있어 가장 큰 걸림돌은 그래핀이 가지고 있는 zero-bandgap으로 인해 반도체로서 효과적인 작동을 하지 못한다는 것이었다. 이 문제에 대해 2010년 미국 UCLA 대학의 Xiangfeng Duan 연구팀은 **그림 3**과 같은 그래핀 nanomesh라는 새로운 구조물을 해결방안으로 제안하였다.⁵ 이 연구를 통해 개발된 그래핀 nanomesh 구조는 밴드갭을 열 수 있으며 이를 이용한 트랜지스터는 상온에서 나노리본 소자보다 100배 이상의 전류를 전송할 수 있었다.

그리고 그래핀을 이용한 고속소자의 초고속화 및 안정화 부분에서는 CNT를 이용한 소자와 비교하였을 경우 연구기간 대비 월등히 앞선 결과를 나타내고 있다. **그림 4**는 간략하게 연구 발전된 결과를 기간으로 비교하여 나타낸 그림이다.⁶ 물론 그래핀을 이용한 트랜지스터의 연구는 CNT를 기반으로 한 연구가 바탕이 되었다는 점을 부인하지는 못한다. 하지만 발전 속도나 무궁무진한 발전가능성을 가지고 있는 그래핀이 고속소자로서의 매우 중요한 위치를 차지할 것이라는 점은 아무도 부인하지 못하는 실정이다.

또한 **그림 5**와 같이 근래에는 고성능 플렉서블 그래핀 트랜지스터

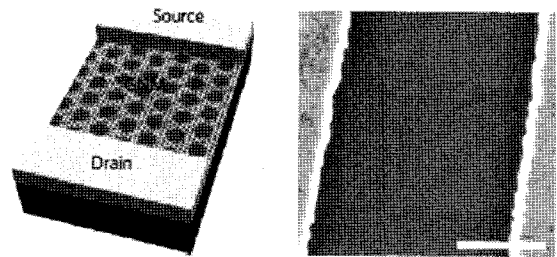


그림 3. Graphene nanomesh FET와 SEM image.⁵

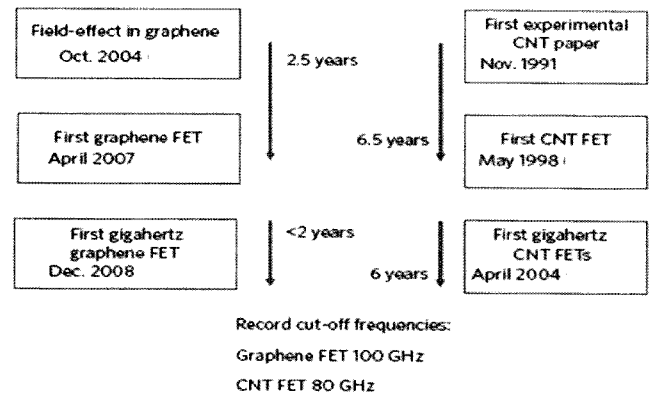


그림 4. CNT FET와 graphene FET의 연구개발 진행도.⁶

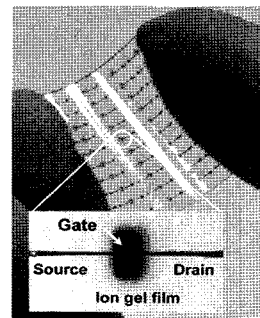


그림 5. 고성능 플렉서블 graphene FET.⁷

에 관한 연구도 발표되고 있어 기존의 실리콘 트랜지스터의 성능 면에서뿐만 아니라 다양한 부분에서 응용이 가능할 것으로 예상되고 있다. 이처럼 짧은 시간에 폭발적인 결과물을 쏟아내는 연구 활동과 이번 노벨상으로 인한 관심이 그래핀을 이용한 고속소자 분야에서 시너지 효과를 창출해 낼 것으로 기대한다.

3. 그래핀 기반 메모리 소자 기술

현재 메모리 소자 분야에서는 빠른 처리 속도, 최소 전력 소비, 데이터의 비휘발성, 저렴한 가격 등의 장점들을 고루 갖춘 차세대 비휘발성 메모리 개발 경쟁이 치열하게 이루어지고 있다.⁸ 주목받고 있는 차세대 비휘발성 메모리 소자들은 소자의 구조 및 소재에 따라 구분되며 대표적으로 FeRAM(Ferroelectric RAM: 강유전체 램), MRAM(Magnetic RAM: 강자성 램), PRAM(Phase Change RAM: 상변화 램), ReRAM (Resistance RAM: 저항 램), PoRAM(Polymer RAM: 폴리머 램), NFGM(Nano Floating Gate Memory: 나노 플로팅 게이트 램) 등이 연구되고 있다.⁹ 위와 같이 다양한 차세대 메모리 소자의 연구가 활발히 진행됨에 따라 일부 메모리 소자에서는 부분적으로 가시적인 결과를 보여주고 있으나 기존의 메모리 소자를 대체할 만한 성과를 얻지 못하고 있다. 이러한 부진한 연구의 돌파구로서 많은 연구자들이 신소재로 각광받고 있는 탄소 기반의 그래핀을 이용한 메모리 소자 연구를 진행하게 되었고, 그래핀의 뛰어난 전기적, 물리적, 광학적 특성 등을 메모리 소자에 적용하고자 하는 연구가 최근 몇 년 동안 활발히 이루어지고 있다.

3.1 트랜지스터형 메모리 소자

그래핀의 전기적 특성, 물리적 특성, 열적 안정성 등의 다양한 이점들을 메모리 소자의 활성층으로 활용하고자 하는 연구가 진행 중이다. 메모리 소자의 활성층으로 활용하고자 하는 연구는 메모리 소자의 주류를 이루는 DRAM과 같은 트랜지스터 메모리 소자의 구조를 이용한 연구가 진행되어 왔다. 메모리 소자에 이용되고 있는 그래핀은 일반적으로 기계적 박리법과 CVD법을 이용해 성장되었으며, 이와 같은 방법으

로 성장한 그래핀은 원하는 기판으로의 전사 및 패터닝이 어렵고 이 과정을 통해 그래핀의 특성이 열화되는 것으로 알려져 있다. 그럼에도 불구하고 **그림 6**과 같이 다층 그래핀을 이용하여 구현된 메모리 소자의 특성이 우수하게 나타나고 있다. 물론 기존 메모리 소자의 특성에 비하면 많이 부족하지만 연구기간이 길지 않았음을 감안한다면 상당히 고무적인 결과라 할 수 있다.

3.2 다중층 그래핀 전극을 이용한 메모리 소자

많은 연구자들이 그래핀의 높은 전하이동도 특성을 활용하여 전극으로 사용하기 위한 연구를 진행중이며, 최근에는 그래핀 전극을 활용한 메모리 소자의 결과가 발표되고 있다. **그림 7**의 소자 모식도에서 사용된 상부전극은 CVD 성장법으로 합성된 그래핀을 사용하였으며, 성장된 그래핀을 분석하기 위해 일반적으로 많이 사용되고 있는 라만 분광법을 사용하였다. 라만 스펙트럼을 분석한 결과 G 피크가 2D 피크에 비하여 상대적으로 크게 나타나 다중층 그래핀으로 이루어졌음을 알 수 있다. 그래핀을 상부 전극으로 이용한 이 메모리 소자는 이극성 저항 특성을 보이며, 여러 번 스위칭시키거나 오랫동안 on 상태 또는 off 상태가 유지되어도 안정적인 것으로 나타났다. 이와 같은 특성은 그래핀을 상부 전극으로 이용할 경우 활성층에 포함된 산소 이온이 그래핀 상부 전극을 산화/환원시킴으로 인하여 메모리 특성을 보인다고 보고하였다.¹¹

3.2 그래핀 옥사이드 메모리 소자

저비용으로 대량의 그래핀을 얻을 수 있다는 장점을 가진 화학적 합성

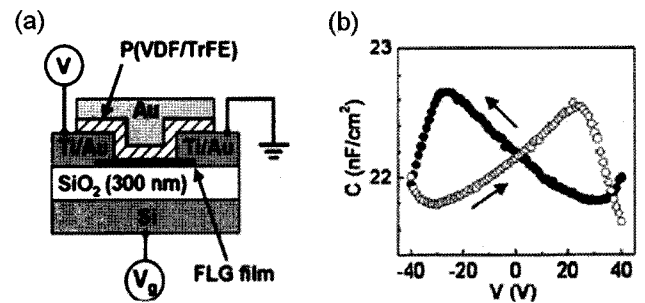


그림 6. (a) 그래핀(FLG)을 이용한 메모리 소자의 구조, (b) 메모리 소자의 전기적 특성.¹⁰

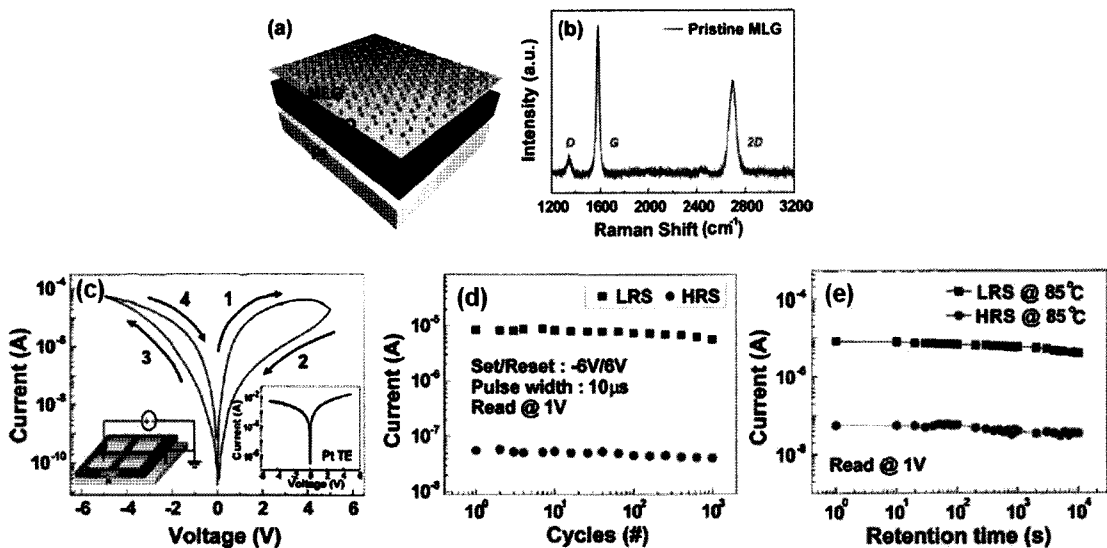


그림 7. 메모리 소자의 구조 및 전기적 특성. (a) MLG과 PCMO로 이루어진 소자의 모식도, (b) 초기 그래핀 층의 라만 스펙트럼, (c)~(e) 메모리 소자의 전기적 특성.¹¹

법에 관한 연구는 빠른 속도로 진행되고 있으며, 또한 화학적 합성법으로 얻을 수 있는 그래핀 옥사이드를 이용한 응용연구도 활발히 이루어지고 있다. 그 중 하나가 **그림 8**과 같은 그래핀 옥사이드를 이용한 메모리 소자이다. 상부와 하부 알루미늄 전극 사이에 스피ن 코팅 방법으로 도포된 그래핀 옥사이드로 구성된 메모리 소자는 이극성 저항 스위칭(bipolar resistive switching) 특성을 보였고, 지속성(retention)과 쓰기/지우기 반복성(writing/erasing endurance) 측정 결과 매우 안정적으로 구동되는 것으로 나타났다.¹² 그래핀 옥사이드 메모리 소자의 이극성 저항 스위칭 특성은 그래핀 옥사이드에 함유된 산소가 상부 전극을 산화시킴으로 상부 계면에 산화막이 생성되면서 높은 저항 상태를 보이게 되고, 전압을 인가함에 따라 상부 전극쪽 계면의 산화막이 다시 환원되면서 낮은 저항 상태로 변하기 때문에 나타난다. 그래핀 옥사이드 메모리의 이극성 저항 특성은 일반 저항 변화 메모리보다 on-off 되는 구간이 거의

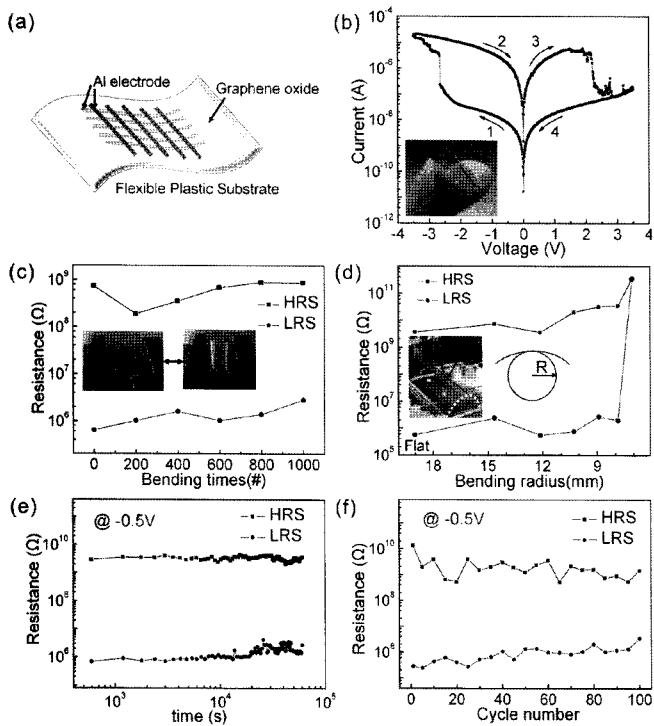


그림 8. (a) 메모리 소자의 구조, (b) 전류-전압 특성 및 광학 이미지, (c) 굽힘 반복 실험, (d) 굽힘 정도 실험, (e) 소자의 지속성, (f) 소자의 on/off 반복성.¹²

일정하기 때문에 안정성이 뛰어나며, 그래핀 옥사이드를 이용한 메모리는 플랫폼 기반 위에서도 제작이 가능하다는 장점을 가지고 있어 차세대 메모리로서 갖추어야 할 요건들에 잘 부합되고 있다.

3.3 기능화된 그래핀 메모리 소자

차세대 메모리 소자로서의 중요 요건인 집적도를 높이고 공정의 최소화를 위하여 많은 연구가 진행되고 있다. 이러한 요구 조건을 만족시키기 위하여 **그림 9**와 같이 그래핀에 도너와 억셉터의 역할을 수행할 수 있는 물질을 결합시켜 줌으로써 소자 제작을 단순화 하였다.¹³

그림과 같이 도너, 억셉터가 함께 있는 소자의 경우 이극성 저항 특성이 나타나며 메모리 동작은 다음과 같다. 도너 물질을 그래핀 옥사이드 가장 자리에 결합시켜주면 그래핀 옥사이드가 도너 물질과의 합성으로 전자를 받아들여 주어 전자가 풍부해지게 되므로 초기에 높은 저항 상태가 되어 메모리 소자는 off 상태이며, 이때 전압을 인가하게 되면 전자가 풍부한 그래핀 옥사이드에서 전자 결핍 현상을 나타내는 물질 쪽으로 이동하게 되어 전자의 이동을 통하여 저항이 낮은 상태가 되므로 메모리 소자는 on 상태가 된다. 위의 기능화된 그래핀 메모리 소자는 기존의 소자에 비해 동작 속도가 느린 수 마이크로 초로 나타났지만 소자의 지속성과 반복성이 매우 안정적이어서 구조의 개선과 도너, 억셉터 물질의 최적화를 이루어 낸다면 우수한 메모리 소자가 될 가능성을 보여 주고 있다.

4. 그래핀 광소자

4.1 광검출기

광검출기는 흡수된 광자 에너지를 전류로 변환하는 광파워나 광량을 측정하는 데 사용되는 소자이다. 이런 광검출기는 일반적으로 원격조정, TV, DVD 기기 등에 사용된다. 광검출기의 스펙트럼 대역폭은 일반적으로 재료의 흡수에 제한되는데, III-V 반도체 기반의 광검출기는 장파장 대역에서 흡수에 한계가 있다. 그러나 그래핀은 한 개 층이 약 2.3%의 입사 빛을 흡수하고, 입사 빛의 0.1% 이하(가시광선 대역)를 반사하며, UV 대역에서부터 THz 대역까지 흡수하므로, 그래핀 기반의 광검출기는 보다 넓은 파장대역에서 작동될 수 있다. 또한 응답속도는 캐리어 이동도에 따르는데, 그래핀은 매우 큰 이동도를 가지고 있어 초고속 광검출기의 구현을 가능하게 한다.

그래핀의 광전자 응답에 대한 이론적/실험적 연구는 다양하게 이루어지고 있으며,¹⁴ **그림 10**과 같이 최근 IBM 그룹에서 metal-graphene-

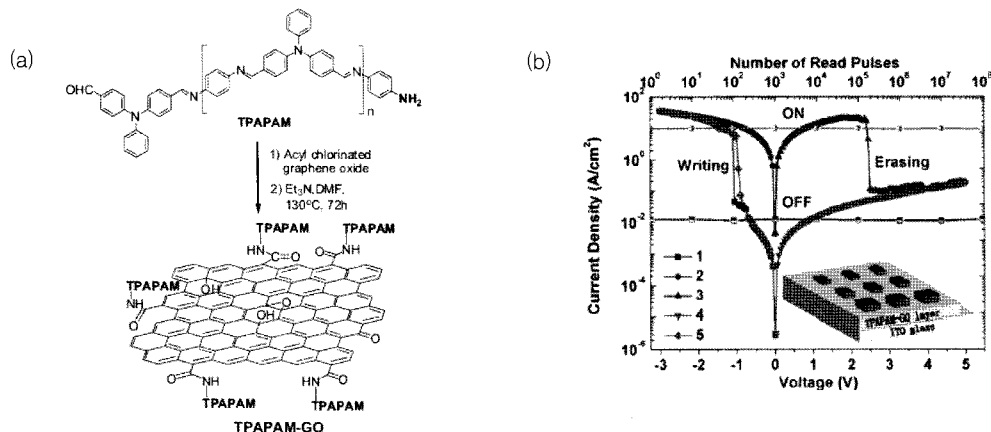


그림 9. (a) TPAPAM-GO의 합성, (b) 메모리 소자의 모식도 및 전류-전압 특성.¹³

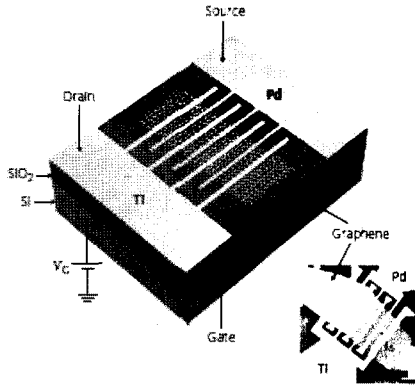


그림 10. 금속-그래핀-금속(Metal-graphene-metal) 구조의 photo-detectors.¹⁵

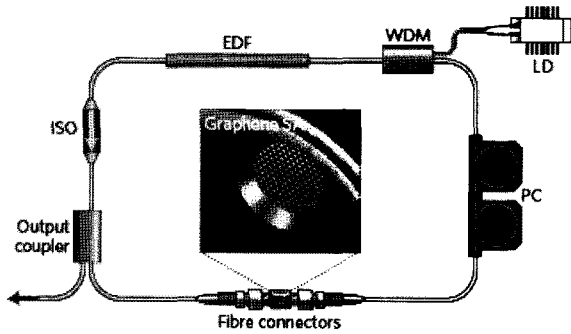


그림 11. Graphene mode-locked ultrafast laser.¹⁷

metal(MGM) 광검출기에 대한 연구 결과를 발표하였다.¹⁵

4.2 초고속 레이저

레이저 산업에서 나노 초 또는 서브피코 초 펄스를 가지는 레이저 광원은 차세대 레이저를 위한 핵심부품이다. 초고속 레이저 시스템의 대부분은 saturable absorber라고 하는 비선형 광요소인 mode-locking 기술을 사용한다. 비선형 소재의 중요 요구사항은 매우 빠른 응답시간, 큰 비선형성, 넓은 파장범위, 낮은 광손실, 높은 파워조절, 낮은 파워소모, 낮은 가격 및 다른 광부품과의 집적 용이성 등이다.¹⁶ 현재 많은 연구가 진행된 반도체 saturable absorber mirror나 단일 CNT 기반의 레이저와 달리, 그래핀은 전자-정공 쌍을 항상 가지고 있어 밴드갭 엔지니어링이나 chirality/diameter 제어가 필요하지 않는 장점이 있다. 초고속 펄스 생성을 위해 laser cavity에 그래핀 기반 saturable absorber를 집적화하려는 여러 연구가 진행되고 있으며, 그림 11과 같이 광섬유 어댑터가 부착된 2개의 광케이블 사이에 graphene saturable absorber (GSA)를 위치한 구조가 일반적이다.¹⁷ 현재 구현된 초고속 펄스의 파장은 1.5 μm 파장으로 이것은 광통신에 사용되는 표준 파장 대역과 일치한다.

4.3 광파장가변기

광파장가변기는 파장 배가, 파라메트릭 증폭 및 진동, four-wave mixing 등 레이저의 파장 접근성을 용이하게 하기 위해 사용되는 소자이다. 그래핀 필름을 이용하여 800 nm 파장에서 150 s 레이저로부터 2nd harmonic 생성,¹⁸ 그림 12와 같이 단일층 그래핀과 2중층 그래핀을 사용하여 근적외선 파장의 tunable light를 생성하기 위한 four-wave mixing,¹⁹ 그래핀 층수의 변화에 의한 비선형성 조정²⁰ 및 파장 무의존 비선형 민감성¹⁹ 등에 대한 연구가 진행되었다. 이런 연구를 통해 광이 미정 등에 응용될 수 있을 것으로 전망된다.

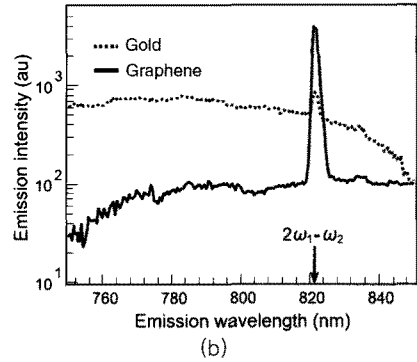
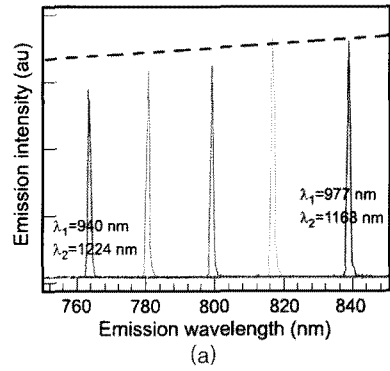


그림 12. (a) Emission spectra of a graphene flake excited with pump pulses of different wavelengths. (b) Emission spectra of a graphene monolayer excited with pump wavelengths (969, 1179 nm), compared to the emission of a 4 nm thick gold film.¹⁹

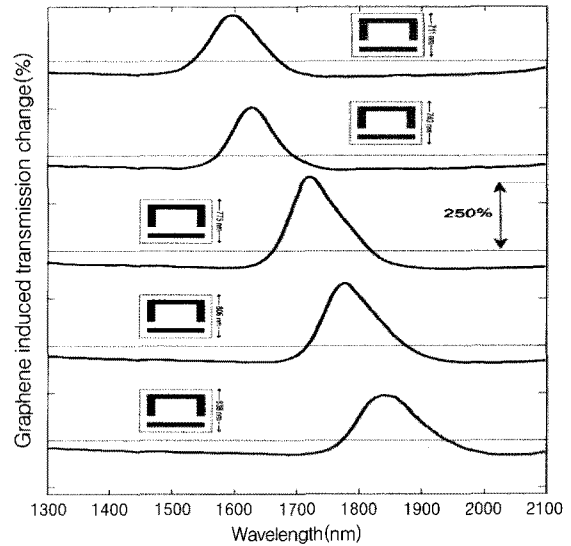


그림 13. Transmission contrast of the graphene covered metamaterial arrays for five different values of the unit cell side.²⁰

4.4 메타물질 및 테라헤르츠 소자

메타물질(metamaterials)은 금속이나 반도체와 같은 전통적인 물질로만 만들어지며, 대단히 작은 반복 패턴으로 배치되어 그 집단적 특성이 변화된다. 그러므로 보통의 물질들로는 달성될 수 없는 방식으로 빛을 다룰 수 있게 되며, 그 대표적인 특성이 음의 굴절률이다. 음굴절률 메타물질을 이용하면 기존 광학렌즈가 회절한계로 인해 반파장보다 작은 분해능을 갖지 못하는 한계를 극복할 수 있다. 그림 13과 같이 최근

메타물질의 표면에 CVD 성장으로 제작된 단일 층의 그래핀을 부착하여 전자기파의 투과특성에 대한 연구가 보고되었다.²⁰ 광투과 특성이 그래핀 단일층을 적용하였을 때 250% 이상 향상되어, 그래핀 멜트브라인에 흡수되는 크미량의 분자 농도를 측정할 수 있는 광센서에 사용될 수 있을 것으로 전망하고 있다.

0.3~10 THz(30 μm ~1 mm 파장) 범위의 THz파는 바이오메디칼 이미징, 안전 리모트 센싱 및 스펙트로스코피 등에 매우 유용하게 사용된다. THz 기술 중에 광원, 검출기, 파장 변환기 등의 분야의 연구가 부족한 실정이며, 최근 광펌핑된 그래핀의 THz 방사²¹ 및 증폭에²² 대한 실험적 관찰이 그래핀 기반의 THz 생성의 가능성을 보여주었고 있다. 그래핀 기반의 THz 소자는 모듈레이터, 필터, 광분배기, 편광기 등에 적용될 것으로 예상된다.

5. 결론

본 특집에서는 그래핀의 특이한 전기적, 광학적 특성을 이용하여 연구되고 있는 트랜지스터, 메모리 소자 및 광소자 연구의 동향에 대해 정리하였다. 그래핀은 기본적으로 밴드갭이 없는 금속성을 띠고 있어 터치패널, 디스플레이, LED, 태양전지 등의 투명전극으로 활용이 모색되고 있다. 또한 밴드갭이 크지 않더라도 전하이동도가 높은 그래핀을 활용하여 RF 또는 THz 영역의 초고속 트랜지스터 연구는 그래핀의 응용 가능성을 보여 주는 한 예라고 할 수 있다. 반면, 디지털 회로에 사용되는 로직 반도체 소자로 활용되기 위해서는 상온에서 동작하기에 적절한 0.3 eV 이상의 밴드갭이 요구되지만, 패터닝 등을 통해 밴드갭을 열 경우 전하의 이동도가 감소하므로 trade-off가 존재한다. 따라서, 그래핀의 반도체 응용 기술은 전하의 이동도를 유지하면서 밴드갭을 열 수 있는 새로운 방법이 출현하거나 그래핀의 전자구조에 적합한 새로운 개념의 소자가 나오기 전에는 기존의 반도체 소자를 대신하는 것은 시기상조인 것으로 판단된다. 반면, 그래핀의 다양한 화학적 기능화를 이용한 메모리 소자는 플렉서블 플랫폼에 적절한 저가격 제품에 응용될 수 있을 것으로 판단된다.

그래핀 전자소자에 비해 그래핀 광소자에 대한 연구는 아직 많은 연구가 진행되지 않으나 최근 연구결과를 비추어 볼 때 그 가능성은 오히려 더 높다고 볼 수 있다. 그래핀의 광학적 특성 연구는 주로 태양전지, LED/OLED 분야에서 발표되고 있지만, 최근 정보통신 분야의 그래핀 광소자 적용에 대한 연구가 활발히 진행되는 것으로 판단된다. 특히 비선형 광소자 분야에서는 그래핀의 광대역 특성을 이용하여 다양한 파장에서의 광특성을 찾는 노력이 필요하다. 그 결과로 초고속 광응답성과 높은 감도를 갖는 투명하고 플렉서블한 광소자뿐 아니라, 레이저 분야에서는 초고속의 가변 레이저의 실현화도 앞당길 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

1. L. Whiteman, *Mitigate risk of obsolete electronics components*, VentureOutsource.com., October (2010).
2. 안종현, 응용기술 측면에서의 그래핀 노벨상 수상의 의의, 물리학과 첨단기술, December (2010).
3. K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, M. I. Katsnelson, I. V. Grigorieva, S. V. Dubonos, and A. A. Firsov, *Nature*, **438**, 197 (2005).
4. Y.-M. Lin and P. Avouris, *Nano Lett.*, **8**, 2119 (2008).
5. J. Bai, X. Zhong, S. Jiang, Y. Huang, and X. Duan, *Nat. Nanotechnol.*, **5**, 190 (2010).
6. F. Schwierz, *Nat. Nanotechnol.*, **5**, 487 (2010).
7. B. J. Kim, H. Jang, S. K. Lee, B. H. Hong, J. H. Ahn, and J. H. Cho, *Nano Lett.*, **10**, 3464 (2010).
8. 김용태, 차세대 메모리, 정보통신산업진흥원 IT 기획서리즈, September (2009).
9. 박재근, 차세대 비휘발성 메모리 소자, 물리학과 첨단기술 (2005).
10. Y.-J. Doh and G.-C. Yi, *Nanotechnology*, **21**, 105204 (2010).
11. W. T. Lee, G. Jo, S. C. Lee, J. B. Park, M. S. Jo, J. M. Lee, S. J. Jung, S. H. Kim, J. H. Shin, S. S. Park, T. H. Lee, and H. S. Hwang, *Appl. Phys. Lett.*, **98**, 032105 (2011).
12. H. Y. Jeong, J. Y. Kim, J. W. Kim, J. O. Hwang, J.-E. Kim, J. Y. Lee, T. H. Yoon, B. J. Cho, S. O. Kim, R. S. Ruoff, and S.-Y. Choi, *Nano Lett.*, **10**, 4381 (2010).
13. X.-D. Zhuang, Y. Chen, G. Liu, P.-P. Li, C.-X. Zhu, E.-T. Kang, K.-G. Noeh, B. Zhang, J.-H. Zhu, and Y.-X. Li, *Adv. Mater.*, **22**, 15 (2010).
14. F. Xia, T. Mueller, Y.-M. Lin, A. V.-Garcia, and P. Avouris, *Nat. Nanotechnol.*, **4**, 839 (2009).
15. T. Mueller, F. Xia, and P. Avouris, *Nat. Photon.*, **4**, 297 (2010).
16. U. Keller, *Nature*, **424**, 831 (2003).
17. Z. Sun, T. Hasan, F. Torrisi, D. Popa, G. Privitera, F. Wang, F. Bonaccorso, D. M. Basko, and A. C. Ferrari, *ACS Nano*, **4**, 803 (2010).
18. J. J. Dean and H. M. van Driel, *Appl. Phys. Lett.*, **95**, 261910, (2009).
19. E. Hendry, P. J. Hale, J. J. Moger, A. K. Savchenko, and S. A. Mikhailov, *Phys. Rev. Lett.*, **105**, 097401 (2010).
20. N. Papasimakis, Z. Luo, Z. X. Shen, F. D. Angelis, E. D. Fabrizio, A. E. Nikolaenko, and N. I. Zheludev, *Opt. Exp.*, **18**, 8353 (2010).
21. D. Sun, C. Divin, J. Rioux, J. E. Sipe, C. Berger, W. A. de Heer, and N. Phillip, *Nano Lett.*, **10**, 1293 (2010).
22. T. Otsuji, H. Karasawa, T. Komori, T. Watanabe, H. Fuki-dome, M. Suemitsu, A. Satou, and V. Ryzhii, *Observation of amplified stimulated terahertz emission from optically pumped epitaxial graphene heterostructures*, Preprint at <http://arxiv.org/abs/1001.5075v1> (2010).