



# 그래핀-헥사고날 보론나이트라이드 복합구조 전자소자



유영준 선임연구원 (한국전자통신연구원 그래핀소자창의연구소)



## 1. 서론

완벽한 이차원 물질의 발견에 대한 기대가 지속되어 온 가운데, 2004년 University of Manchester의 Andre Geim 교수 그룹에서 이차원 탄소 원자 네트워크인 그래핀(Graphene)을 그래파이트(Graphite)로부터 기계적 박리(Mechanical exfoliation) 방법으로 얻음으로써 그 가능성을 보여 주었다 [1]. 이후, 2005년에 Geim 그룹과 Columbia University의 Philip Kim 교수 그룹에서 기존의 양자 홀 효과(Quantum hall effect)와는 다르게 그래핀에서는 반정수 양자 홀 효과(Half-integer quantum hall effect)로 나타나는 특이한 현상을 발견 하였다. 즉, 그래핀의 경우 전하의 유효 질량이 0에 가까워지며 그 에너지 관계가 질량이 없는 Dirac 입자로 표현됨을 증명 하였고 이로부터 그래핀의 높은 전하 이동도(Carrier mobility)가 전자소자로의 응용에 큰 기여를 할 것으로 예상 하고 있다 [2,3]. 하지만 이러한 예상을 현실화 하기 위해서는, 기존에 적용하고 있는 그래핀 전자소자 구현 시 구조적인 결함에 의한 응용한계를 극복해야 하는 것 또한, 하나의 숙제이다. 특히, 그래핀 전자소자 구성 요소 중 기존에 많이 사용 되고 있는 산화막 실리콘( $\text{SiO}_2$ ) 절연 바닥 물질(Insulating substrate)의 한계

가 지적되고 있다. 사실, 그래핀을 이용한 전자소자는 그 고유의 벌라스틱한(Ballistic) 전자 수송 특성 구현을 위해 그래핀을 받쳐주는 절연물질 바닥(Insulating substrate)의 역할이 중요하다. 삼차원 반도체의 경우 실리콘 산화막( $\text{SiO}_2$ ) 바닥면의 거칠기(Roughness)가 시료의 두께에 비해 충분히 작기 때문에 실리콘 산화막 바닥을 이용한 전자 소자 구현을 진행 하는 데는 문제가 없었다. 하지만 그래핀의 경우 한 층(Single layer)의 두께가 0.35 nm의 원자 층의 두께를 가지고 있기 때문에 기존의 실리콘 산화막 위에 시료를 준비하면 그래핀의 표면 모양(Morphology)이  $\pm 0.5$  nm 크기의 실리콘 산화막 표면의 거칠기를 그대로 반영한다. 또한, 이러한 기계적인 형태뿐만 아니라, 실리콘 산화막 표면의 나노미터 스케일의 전하 불균일함이 직접적으로 그래핀에 영향을 주어 그래핀 표면의 나노미터 크기의 전도도 불 균일을 형성 시켜 전자-홀 웅덩이(Electron-hole puddle)를 만든다 [4,5]. 이러한 전자-홀 웅덩이는 그래핀 채널 내에서 전하들의 이동 도를 방해하는 장벽으로 작용하여 그래핀의 성능을 저하시키므로, 이러한 문제점을 극복하고 높은 성능의 그래핀 전자 소자 구현을 위한 알맞은 절연물질(Insulator)에 대한 연구의 필요성이 강조 되고 있다. 본문에서는 이러한 연구 방향에 맞추어서 최근 많은 관심을 받고 있는 헥사고날 보론나이트



라이드 (Hexagonal Boron Nitride, h-BN) 절연 층의 그래핀 전자소자로의 도입에 대한 연구진행 상황에 대해서 다루도록 하겠다.

## 2. 본론

헥사고날 보른나이트라이드는 그림 1(a)와 같이 보른 원자와 나이트라이드 원자가 헥사고날 구조로 이루어져있기 때문에 그래핀과 그 원자구조가 거의 흡사하다 [6]. 이러한 유사 구조로 인해 그래핀과의 격자 불일치 (Lattice mismatch)율이 1.7%이며 [7], 밴드 갭이 대략 5 eV로써 [8] 절연 물질로의 특성을 이미 가지고 있다. 또한, 그래핀과 같이 층과 층이 반데르 발스 힘 (Van der Waals force)으로 결합 되어진 판상 구조이기 때문에 기계적 박리 방법으로 한층, 한층을 선택적으로 준비 할 수 있다. 이러한 방법을 이용해 그림 1(b)의 구성도와 같이 그래핀과의 접목을 통한 그래핀 고유의 성능을 향상시키는 연구를 진행 하거나, 헥사고날 보른나이트라이드의 두께에 따른 전자 터널링 효과 (Tunneling effect)를 이용한 터널링 전자소자 구현 등의 여러 가지 실험들이 진행 되고 있다.

그래핀과 헥사고날 보른나이트라이드의 접목에 따른 연구의 시작점은 Columbia University에서 처음 그래핀 전자 소자를 헥사고날 보른나이트라이드 위에 준비하는 결과를 그림 2와 같이 보고 하면서 시작 되었다 [9,10]. 그림 2(a)와 같이 매우 평평한 헥사고날 보른나이트라이드 위에 준비된 그래핀 소자를 구현 할 수 있었으며, 이 결과로부터 그림 2(b)에서 보이듯이 원자력 주사탐침 현미경 (Atomic force microscope, AFM)을 이용하여 거칠기를 비교 했을 때 실리콘 산화막 바닥보다 헥사고날 보른나이트라이드의 경우 표면의 거칠기가 세배나 낮은 것을 알 수 있다 [9]. 또한, Massachusetts Institute

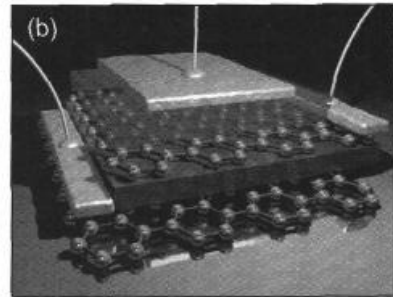
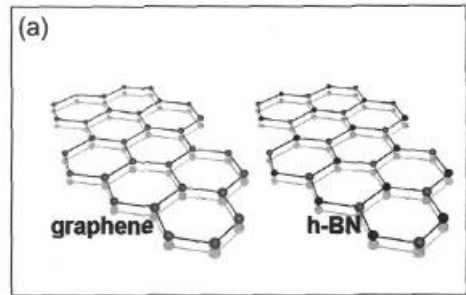


그림 1. (a) 벌집구조인 그래핀과 헥사고날 구조인 보른나이트라이드의 원자 구조 이미지, (b) 그래핀과 헥사고날 보른나이트라이드를 접합해서 얻을 수 있는 투과 전자소자의 구성도 [6,13].

of Technology (MIT)에서 보고 한 것과 같이 주사형 터널 현미경 (Scanning Tunneling Microscope, STM)을 이용해서 헥사고날 보른나이트라이드와 산화막 실리콘 위에 준비된 그래핀 내의 전자-홀 응당이 정도를 그림 2(c),(d) 같이 각각 비교했을 때, 헥사고날 보른나이트라이드 위에 준비된 그래핀의 경우 전자-홀 에너지 응당이 실리콘 산화막 바닥 위에 준비 한 경우에 비해 거의 없는 것을 관찰할 수 있으며 [10], 이러한 장점을 바탕으로 그림 2(e)와 같이 높은 전하 이동도 ( $\sim 60,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ )를 얻은 것을 보고하고 있다 [9,11]. 즉, 이로부터 헥사고날 보른나이트라이드 바닥을 이용할 경우 기계적, 전기적으로 충분히 평평한 그래핀을 얻을 수 있음을 알 수 있으며, 높은 전하 이동도 뿐만 아니라, Suspended 그래핀에서 처음 보였던 분수의 양자 홀 효과 (Fractional quantum hall effect) 또한, 그림 2(e)와 같이 얻음으

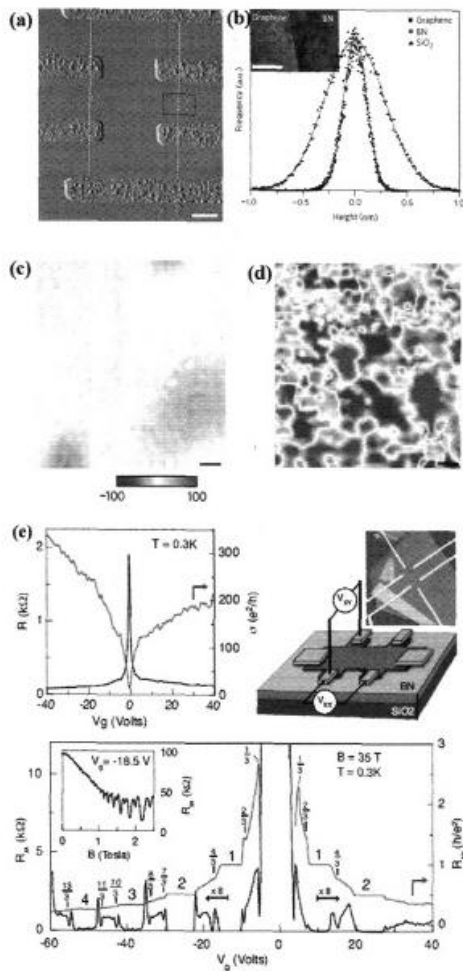


그림 2. (a) 주사형 탐침 현미경 (Atomic Force microscope)을 이용해서 얻은 헥사고날 보른나이트라이드 위의 그래핀 표면 이미지, (b) 주사형 탐침 현미경으로부터 얻은 헥사고날 보른나이트라이드와 그 위의 그래핀 그리고 산화막 실리콘 바닥면의 거칠기 비교 그래프, 주사형 터널 현미경 (Scanning Tunneling Microscope, STM)을 이용해서 얻은 (c) 실리콘 산화막 그리고 (d) 헥사고날 보른나이트라이드 위에 준비된 그래핀의 전자-홀 웅덩이 (Electron-hole puddle) 이미지, (e) 상단 우 : 헥사고날 보른나이트라이드 위에 준비된 그래핀 전자소자의 구성도와 광학 이미지, 상단 좌 : 이 소자로부터 얻은 저온 ( $T=0.3$  K)에서의 게이트 전압에 따른 저항 변화, 하단 : 이 소자로부터 얻은 분수의 양자홀 효과 (Fractional quantum hall effect) 결과 [9,10].

로써 [11], 헥사고날 보른나이트라이드를 바닥으로 사용했을 때 그래핀의 완벽한 이차원 전자 기체 특성을 구현할 수 있음을 확인할 수 있었다.

다른 한편으로는 이러한 헥사고날 보른나이트라이드의 절연체로써의 응용을 위한 기초 실험들로 그림 3과 같이 두께가 증가함에 따른 전류 투과도 (Current tunneling) 측정 결과들이 보고되었다. 그림 3(a)의 결과는 Columbia University에서 골드 (Au) 층이 코팅되어있는 Mica 위에 여러 가지 다른 층을 가지고 있는 헥사고날 보른나이트라이드를 준비한 후 전류가 통하는 주사탐침현미경을 이용하여 두께에 따른 전류 투과도를 측정한 결과이다. 또한, 같은 실험을 그림 3(b)와 같이 면적 단위로의 절연 특성을 확인하기 위해 University of Manchester에서 골드 전극 사이 혹은 그래핀 사이에 헥사고날 보른나이트라이드를 끼워 넣은 후 전류 투과도를 실험하였다. 이 결과들로부터 1~3층까지는 낮은 전압에도 바로 전자가 투과되는 직접 투과 (Direct tunneling) 현상을 보였으며, 4번째 층의 헥사고날 보른나이트라이드에서부터 절연체로써의 특성이 조금씩 나타나기 시작하였다. 최종적으로 산화막 실리콘 ( $3.25$  eV,  $8\sim 10$  MV/cm)과 비슷한 가로막 높이 (Barrier height for tunneling  $\sim 3.03 \pm 0.3$  eV)와 절연내력 (Dielectric strength  $\sim 7.94$  MV/cm)을 측정함으로 [12,13], 헥사고날 보른나이트라이드가 산화막 실리콘을 대체할 수 있는 절연 능력을 가지고 있음을 확인하였다. 게다가 그래핀과 헥사고날 보른나이트라이드의 접합구조의 직접적인 원자 크기의 이미지를 투과 전자현미경 (Tunneling electron microscopy, TEM)을 이용하여 얻음으로써, 그림 4와 같이 헥사고날 보른나이트라이드 부분은 그래핀과는 다르게 이미지의 선명도가 높은 절연체 특성을 확연히 보여주며, 그 결과 그래핀과 그래핀 사이를 완벽하게 절연시킴을 확신할 수 있었다 [14].

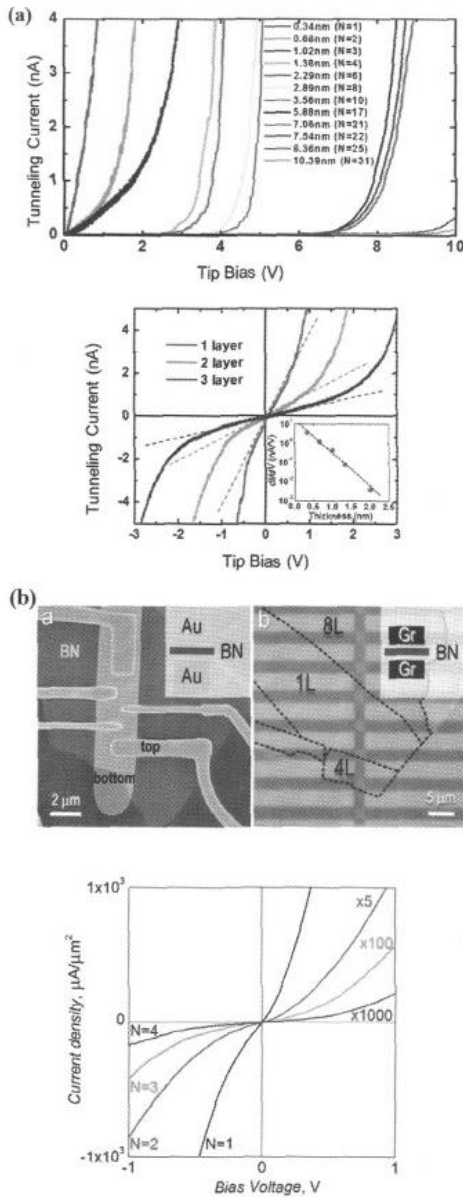


그림 3. (a) 상단 : 두께에 따른 헥사고날 보르나이트라이드의 전류 투과도 그래프. 하단 : 1, 2 그리고 3 층의 헥사고날 보르나이트라이드의 전류 투과도 만을 선택해서 보여주는 결과. (b) 상단 : (좌) 골드 (Au) 전극 혹은 (우) 그래핀을 헥사고날 보르나이트라이드의 위아래에 접합시킨 전류투과도 실험을 위한 소자 구조의 이미지들. 하단 : 1~4층까지 각 층에 따른 헥사고날 보르나이트라이드의 전류 투과도 결과 [12,13]

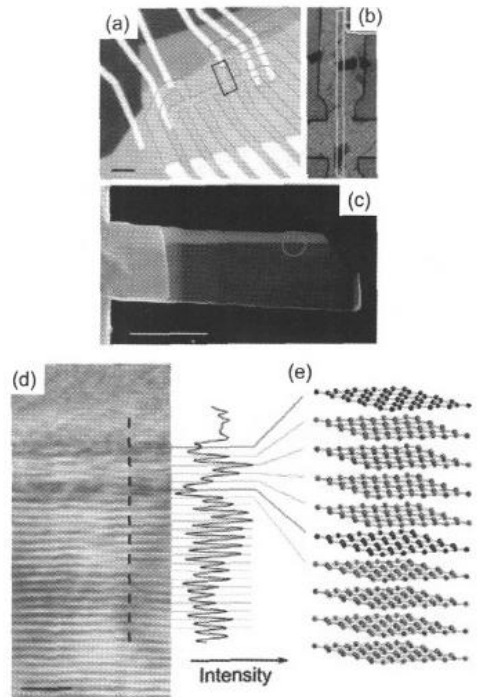


그림 4. (a) 그래핀과 헥사고날 보르나이트라이드의 접합 전자소자의 광학적 이미지. (b) 이미지 (a)에 점선으로 표시된 영역을 확대 측정된 주사 전자 현미경 (Scanning Electron Microscopy, SEM) 이미지. (c) 투과 전자 현미경 (Tunneling Electron Microscopy, TEM)을 위해 준비된 (b) 소자의 단면도 주사 전자 현미경 이미지. (d) 준비된 시료 (c)에 원으로 표시된 부분의 투과전자 현미경 이미지. (e) 투과 전자 현미경 이미지에서 그래핀과 헥사고날 보르나이트라이드를 구별하기 위한 원자 층 이미지 [14].

이러한 헥사고날 보르나이트라이드와 그래핀 접촉 실험의 일 예로 고집적 전자 소자로의 응용 분야로 수직 방향으로 누설전류 없이 그래핀과 그래핀간의 상호작용을 연구하기 위한 Coulomb drag 현상을 그림 5와 같이 구현할 수 있었다 [15]. 이 실험의 경우 10~30 nm 두께의 헥사고날 보르나이트라이드 위, 아래로 그래핀을 올린 후 한 면의 그래핀 채널의 홀 (Hole) 혹은 전자 (Electron) 들의 이동을 조절하여 헥사고날 보르나이트라이드 절연층 반대편 그래핀 채널의 전하이

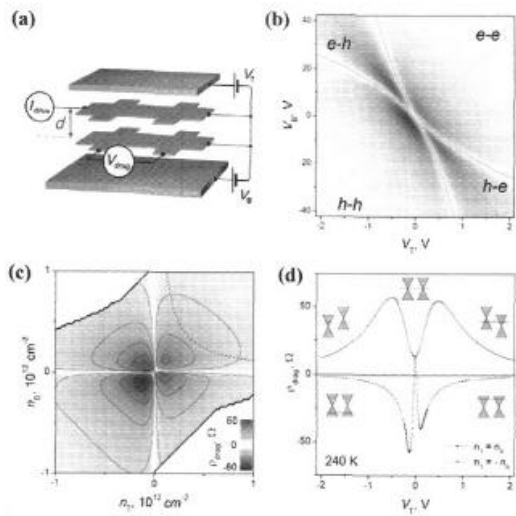


그림 5. (a) Coulomb drag 현상 실험을 위해 준비된 그래핀-헥사고날 보른나이트라이드 전자 소자의 구조도. (b) 하단 전압 (Back-gate voltage)과 상단 전압 (Top-gate voltage) 조절에 따른 하단의 Drag 되는 그리핀에서 측정되는 저항 ( $\rho_{drag}$ ) 변화. (c) 결과 (b)를 상단과 하단의 그리핀의 전하 밀도 ( $n_T$  그리고  $n_B$ )로 다시 표현한 결과. (d) 결과 (c)에서 점선으로 표시된 부분과 같이 상단과 하단 그래핀의 전하 밀도가 같은 상태 ( $n_T = -n_B$ ,  $n_T = n_B$ )에서의  $\rho_{drag}$  변화 [15].

동을 유도하는 실험 결과를 얻을 수 있었다. 비슷한 전자소자 구조로부터 또한, 수직 필드 효과 터널링 트랜지스터 (Vertical field effect tunneling transistor)를 구현함으로써 헥사고날 보른나이트라이드 이용 시 누설 전류 없이 나노미터 스케일의 그래핀 트랜지스터를 수직방향으로도 제작할 수 있는 가능성을 제시 하였다 [16].

앞에서 언급한 대부분의 결과들이 순도는 높으나 면적이 작은 그래파이트 파우더 (Powder)로부터 준비된 그래핀과의 접목을 통한 연구 결과들이기 때문에, 산업화 응용을 위해선 화학적 증착 합성 방법 (Chemical vapor deposition, CVD)을 이용한 대면적 그래핀과 헥사고날 보른나이트라이드의 접목을 필요로 하고 있다. 그 하나의 예로 그림 6에서와 같이 화학적 증착 합성법을 이용해 준

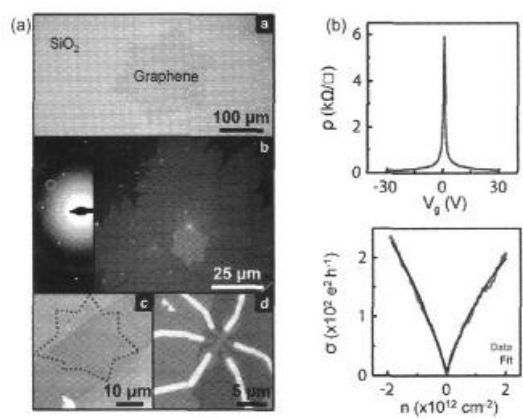


그림 6. (a) a : 화학적 증착 합성법으로 준비된 단일 크리스탈 그래핀의 산화막 실리콘 바닥면 위에서의 광학 이미지. b : 단일 크리스탈의 가운데 두 번째 층 (파랑색)과 외부의 단일층 (보라색)의 그래핀의 결 경계선이 없을 확인 해 주는 높은 분해능의 투과 전자 현미경 (TEM) 이미지. c : 화학 증착 합성 방법의 그래핀을 헥사고날 보른나이트라이드에 올린 광학적 이미지. d : 최종적으로 c의 시료에 전극을 올려서 준비한 그래핀 전자 소자. (b) 준비된 그래핀 전자 소자로부터 구한 (상단) 게이트 전압 변화에 따른 저항 변화와 (하단) 전하 밀도 변화에 따른 전도도 변화 결과 [17].

비한 작은 단일 크리스탈의 그래핀을 헥사고날 보른나이트라이드에 올린 전자 소자로부터 기존의 산화막 실리콘 위의 화학적 증착 합성 방법으로 얻은 그래핀으로는 구현하기 힘들었던  $30,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 의 높은 전하 이동도를 얻을 수 있었다 [17]. 하지만 대면적 그래핀의 경우 여러 방향의 단일 크리스탈들의 집합체이기 때문에 헥사고날 보른나이트라이드와의 접목을 통한 전기적 특성 향상이 바로 가능한지는 의문이었다. 즉, 화학적인 증착 방법의 경우 그래핀의 합성이 시작되는 출발점 (Seed)으로 부터 사방의 평면을 따라 단일 크리스탈 방향으로 자라다가 이웃의 다른 방향 구조로 자라면서 다가온 그래핀과 만나는 부분에 생기는 결 경계선 (Grain boundary)이 전자소자로 구현했을 때 전하의 이동을 방해할 것이라 예상하고 있었다.



이렇듯 대면적 그래핀의 전기적 특성에 회의적인 가운데, 기존에 화학적 증착 방법으로 생성된 대면적 그래핀의 전기적 특성이 낮은 이유를 앞에서 언급한 결 경계선이 원인일 것이라는 예상을 반박한 결과가 Cornell University에서 보고 되었다. 다시 말해, 꿀벌집 (Honeycomb)모양에서 각각 탄소 원자들이 하나 더 있거나 빠진 구조의 결 경계선 연결이라 할지라도 완벽히 연결되어만 있다면 결 경계선에서 전자 이동의 방해는 거의 없다는 결과를 그림 7과 같이 보고 하였다 [18]. 그림 7에서는 투과 전자현미경으로 처음에 화학적 증착 방법으로 생성된 그래핀의 크리스탈 방향과 결 경계선 위치를 확인한 후 결 경계선에서 잘 이어진 구조인 "Growth A"와 각각의 그래핀 크리스탈이 자라다가 말아서 서로 만나지 못해 결 경계에서 연결이 되지 않은 "Growth C"를 중간에 놓인 그래핀 전자 소자를 각각 준비, 측정 하였다. 그 결과 "Growth A"의 경우 결 경계선을 포함하거나 혹은 제외하거나 그리 큰 저항 변화가 보이지 않은 반면, "Growth C"의 경우는 결 경계선이 포함된 경우 전자 소자의 저항이 높이 증가됨을 확인하였다. 이로부터 이제까지 화학적 증착 합성 방법으로 준비된 그래핀의 전기적 특성이 나쁜 이유는 원자 단위에서 탄소 원자가 하나 비거나, 하나 더 있는 결 경계선 구조의 문제가 아니라, 생성 시 완벽히 서로 이어지지 않은 경계에 의한 영향이라는 결론을 보여 주었다. 이러한 대면적 그래핀의 특성 보증 연구 결과에 힘입어, 헥사고날 보른나이트라이드의 화학적 증착 합성법으로 그래핀과 함께 구현하는 연구 진행 또한 탄력을 받기 시작했다. 지금까지는 고온 (~1,500℃)에서 12시간 동안 준비된 파우더 형태로부터 [19] 기계적 박리 방법을 이용하여 얻은 헥사고날 보른나이트라이드를 그래핀과 수직으로 쌓아서 구현된 전자 소자에 대한 연구 결과들이 주를 이루어 왔으나, 이 경우 준비되는 헥사고날 보른나이트라이드의

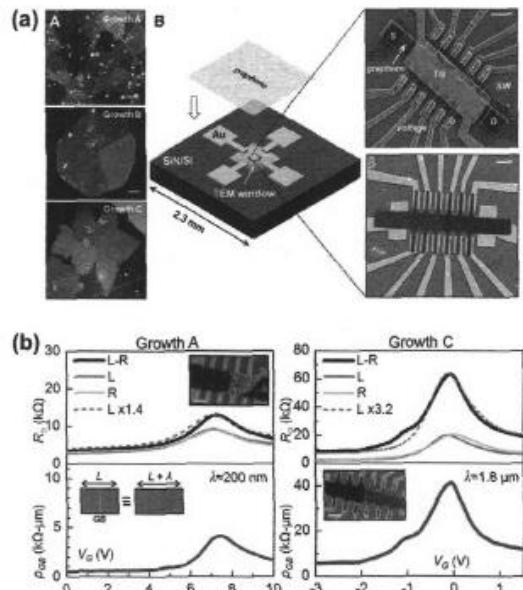


그림 7. (a) A : 화학적 증착 합성 방법을 통해 준비된 그래핀의 결 경계선 (Grain boundary)을 보여주는 투과 전자 현미경 (TEM) 이미지들. B : 결 경계선이 중앙에 오게 하여 준비된 그래핀 전자 소자의 구조도 및 주사 전자 현미경 (SEM) 이미지들. (b) 결 경계선이 원자 하나가 비거나, 많은 구조 변화 외에는 서로 잘 연결된 구조 "Growth A", 와 연결이 되지 않고 사이 공간이 비어 있는 "Growth C" 경우의 그래핀 소자의 결 경계선을 포함하거나 제외 한 경우의 저항 변화 측정 결과. Growth A의 경우 결 경계선이 포함된 저항(검은색)이 제외한 부분의 저항(회색)과 차이가 그리 크지 않은 반면, Growth C의 경우 결 경계선이 포함된 저항(검은색)이 제외한 부분의 저항(회색) 보다 높음을 보여주고 있다 [18].

작은 면적과 그래핀과의 접촉 구조가 수직적이라는 응용 한계가 있기 때문에 실용성에서 많은 제약을 받고 있었다. 그러나 이를 극복하여 좀 더 상용화에 근접한 그래핀-헥사고날 보른나이트라이드 구조에 대한 연구결과가 Cornell University로부터 또한 보고되었다 [20]. 즉, 화학적 증착 합성법으로 첫 번째 그래핀을 구리 (Cu)판 위에 합성한 후 원치 않는 부분을 식각 공정 방법으로 제거하고 그래핀이 없어진 부분에 다시 두 번째 그

래핀 혹은 헥사고날 보른나이트라이드를 합성하여 수평적으로 그래핀-그래핀 혹은 그래핀-헥사고날 보른나이트라이드 접합 구조를 각각 구현 하였다. 이때 각각의 물질들이 이어지는 결 경계선에서의 특성 저하는 앞에서 설명된 것과 같이 대부분 무시할 수 있다. 이 결과로 그림 8(a)에서 보이는 것 같이 그래핀과 헥사고날 보른나이트라이드를 선택적인 부분에 수평적으로 연결 할 수 있는 결과를 보여 주고 있으며, 또한, 그래핀-헥사고날 보른나이트라이드 접합 구조를 쌓아서 선택적인 그래핀-그래핀 전극 라인의 수직 접합 구조를 그림 8(b)와 같이 구현하였다. 이러한 방법을 통한 그래핀-그래핀 혹은 그래핀-헥사고날 보른나이트라이드 수평 접합 구조를 이용하여 대용량 그래핀 전자소자 집합체를 손쉽게 구현할 수 있음을 보여 줌으로써 그래핀-헥사고날 보른나이트라이드 전자구조의 상용화에 한 단계 다가 설 수 있음을 확인 하였다.

### 3. 결론

그래핀 고유의 전기적 특성을 최대한 끌어내기 위해 도입된 헥사고날 보른나이트라이드 바닥을 이용하여 현재 고성능 그래핀 소자를 구현한 기초 실험 진행들이 활발히 진행되고 있다. 그 결과 그래핀 전자 소자의 실험에 있어서 그래핀 본연의 특성을 이끌어낼 수 있는 헥사고날 보른나이트라이드의 절연체로의 응용을 통해 기존에 제약적이었던 특성 한계를 극복하여, 본연의 이차원 전자 기체 특성 연구를 가능하게 하였다. 물론 헥사고날 보른나이트라이드를 포함한 이차원 물질들의 미래가 긍정적인 것만은 아니다. 현재 사용되고 있는 이차원 물질들 간의 수직적인 접합단계에서 이들 사이에 생기는 불순물들이 잡혀있는 버블들을 피할 수 없는 문제점들도 지속적으로 제기되고 있다. 하지만

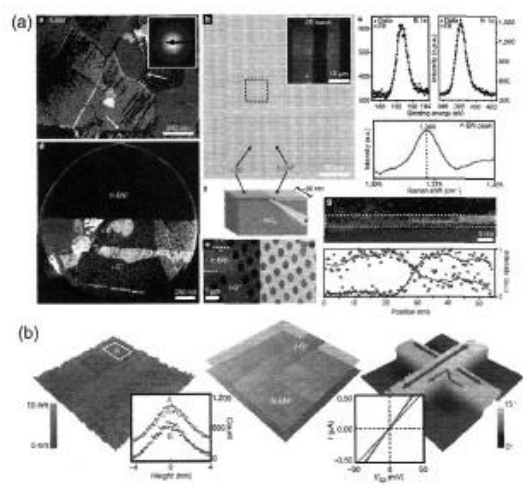


그림 8. (a) a : 화학적 증착 합성법으로 준비된 헥사고날 보른나이트라이드의 투과 전자현미경 이미지. b : 두번에 걸친 화학적 증착 합성법을 이용해 준비된 그래핀-헥사고날 보른 나이트라이드 접합 구조의 광학이미지. c : 각각의 그래핀과 헥사고날 보른나이트라이드의 특성 판단을 위한 x-ray 광전 효과 (x-ray photoelectron) spectroscopy 및 Raman spectroscopy. d : 그래핀과 헥사고날 보른나이트라이드의 수평 접합 부분의 경계면 확인을 위한 투과 전자현미경 이미지. e : 단면 측정을 위해 2 μm 크기의 구멍 위에 준비된 그래핀-헥사고날 보른나이트라이드 접합 시료의 주사 전자현미경(SEM) 이미지. f : b의 광학 이미지 이해를 돕기 위한 구조도. g : 그래핀-헥사고날 보른나이트라이드 접합부분을 확인하기 위한 성분측정 이미지. (b) 좌 : 그래핀-헥사고날 보른나이트라이드 접합 구조를 층층이 쌓아 준비된 수직 구조의 주사 탐침 현미경 이미지. 중간 : 이 구조의 이해를 위한 개략도. 우 : 이 구조의 전기력 탐침 현미경(Electric Force Microscopy, EFM) 이미지 [20].

현재 우리나라가 화학적 증착 합성방법에 의한 대면적 그래핀 구현 및 전자 분야에서 세계 제일의 위치에서 있듯이 꾸준한 연구와 노력을 한다면, 더욱 높은 품질의 그래핀-헥사고날 보른나이트라이드 구조 합성뿐만 아니라 다른 이차원 물질과의 접합에 생기는 많은 문제점들도 극복하여 이차원 물질들의 발굴 응용 분야의 선두에 설 수 있을 것으로 생각된다.



### 참고 문헌

[1] K. S. Novoselov et. al., Science 306, 666 (2004).

[2] K. S. Novoselov et. al., Nature 438, 197 (2005).

[3] Y. Zhang et. al., Nature 438, 201 (2005).

[4] E. Stolyarova et. al., Proc. Nat. Acad. Sci. USA 104, 9209-9212 (2007).

[5] J. Martin et. al., Nature Phys. 4, 144 (2008).

[6] I. Meric et. al., International Electron Devices Meeting, pp. 23.2.1-23.2.4. (2010).

[7] G. Giovannetti et. al., Phys. Rev. B. 76, 073103 (2007).

[8] K. Watanabe et. al., Nature Mater. 3, 404 (2004).

[9] C. R. Dean et. al., Nature Nanotech. 5, 722 (2010).

[10] J. Xue et. al., Nature Mater. 10, 282 (2011).

[11] C. R. Dean et. al., Nature Phys. 7, 693 (2011).

[12] G. -H. Lee et. al., App. Phys. Lett. 99, 243114 (2011).

[13] L. Britnell et. al., Nano lett. 12, 1707 (2011).

[14] S. J. Haigh et. al., Nature Mater. 11,764 (2012).

[15] R. V. Gorbachev et. al., Nature Phys. Doi:10.1038/nphys2411 (2012).

[16] L. Britnell et. al., Science, 335, 947 (2012).

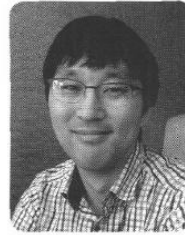
[17] N. Petrone et. al., Nano lett. , 12, 2751 (2012).

[18] A. W. Tsen et. al., Science, 336, 1143-1146 (2012).

[19] Y. Kubota et. al., Science 317, 932 (2007).

[20] M. P. Levendorf et. al. Nature 488, 627 (2012).

### 저자약력



성명 : 유영준

◆ 학력

- 1999년  
충남대학교 자연과학대학  
물리학과 이학사
- 2001년  
광주과학기술원 공과대학  
정보통신공학과 공학석사
- 2006년  
서울대학교 자연과학대학  
물리학과 이학박사

◆ 경력

- 2006년 - 2008년  
서울대학교 자연과학대학  
물리학과 박사 후 과정
- 2008년 - 2011년  
컬럼비아 대학교  
(Columbia University)  
박사 후 과정
- 2011년 - 현재  
한국전자통신연구원 (ETRI)  
그래핀소자창의연구실  
선임연구원

