고성능 소자 개발을 위한 그래핀의 2D 나노 소재로써의 물성 분석

문성준, 이동열

인천과학예술영재학교

ABSTRACT: 본 연구는 그래핀, 전이금속 칼코겐화합물(TMD), 육방정 질화붕소(h-BN)을 중심으로 2D 나노 소재의 특성과 응용 가능성을 조사하였습니다. 그래핀층의 비편재화 전자의 결합성 오비탈 점유 특성으로부터 전도띠와 원자가 띠가 겹치게 되어 밴드갭이 0이 되는 특성은 뛰어난 전기전도성을 보였다. 이와 그래핀의 기계적 강도를 활용하여 고성능 트랜지스터를 설계하였으며, 화학 기상 증착(CVD)를 이용하여 이러한 단일층 그래핀 합성의 효율적인 방법 및 소자 제작, 이들의 시뮬레이션을 이용한 전기적 특성 평가를 계획하였다. 선행 연구에서 그래핀 트랜지스터는 기존 실리콘 트랜지스터의 약 10배의 전자 이동도를 보였으며, 낮은 임계 전압(0.4V)를 통해 고속 및 저전력 동작이 가능함을 확인했다. 그러나 그래핀의 밴드갭 부재로 인해 낮은 온/오프 전류 비율이라는 실용화에의 한계점이 나타났다.

1.서론 ( Introduction )

탐구 활동의 진행을 통해 먼저 2D 나노 소재의 예로 그래핀, TMD, h-BN의 전기적.구조적 특성과 그 활용을 이해한다.이러한 이해를 바탕으로 그래핀 소재의 전기전도성을 이용하여 트랜지스터 소자 제작에의 활용 방안을 제시하고, 이의 경제성을 특성, 가격, 활용도의 측면에서 비교해보고자 한다.

2.재료 및 방법 ( Materials and Methods )

**2.1 2D 나노 소재의 구조적 특성**

**2.1.1 그래핀**

그래핀은 흑연의 단원자층 구조로 육각 고리 구조의 탄소 원자로 구성된다. 이는 벌크 흑연으로부터 Scotch Tape Technique 등의 기계적 박리법, 또는 화학적 증기 증착법의 이용으로 수득할 수 있다. 그래핀은 단분자층의 박막 형태로 생성되며 내부의 탄소 원자들은 각각이 sp2 혼성화되어 육각 구조를 이룬다. 각 탄소 원자 사이의 결합 길이는 142. pm이며 결합을 이루지 않는 하나의 2pz 오비탈이 존재한다. 이는 결합된 탄소의 부재 또는 sp3 혼성화 원자로 인해 변형된 구조를 형성할 수 있다. 2pz 오비탈의 전자는 상온에서 비편재화 되어 있으며, 이 비편재화 전자는 구분된3개의 결합성, 반결합성 오비탈 중 결합성 오비탈을 모두 채운다. 이들이 결합한 그래핀 층은 전도띠와 원자가 띠의 겹침으로 밴드갭이 0이 되며, 전자가 에너지 출입의 필요 없이 이동할 수 있다. 또한 그래핀 내에서의 전하 운반자는 질량이 없는 디랙 페르미온으로, 높은 열.전기 전도율을 달성시킬 수 있다.[1][3]



Fig. 2 단원자층 그래핀의 형성에 의한 전자 띠 겹침.[2]

**2.1.2 TMD**

밴드갭이 0인 그래핀의 특성은 이를 반도체로 이용하는 것이 부적합하며, 따라서 전이금속 칼코겐화합물(TMD)를 이용한 이차원 소재가 이용될 수 있다. 전이금속 칼코겐화합물은 구성 원소에 따라 금속, 초전도성, 반도체의 특성을 나타낼 수 있으며 황화물, 셀레늄화물이나 텔루륨화물이 대표적인 반도체로 이용될 수 있다. 벌크 흑연과 마찬가지로 구성 원자간 매우 강한 공유결합을 유지하는 각 층이 층간 약한 반데르발스 결합을 하는 층상구조를 이루고 있으나, 그 층상 구조가 수 층 내로 제한된다.

**2.1.3 h-BN**

H-bN 은 그래핀과 유사한 B-N 간 sp2 혼성화로 층상 구조를 띠나, 그래핀의 C-C 결합과 비교하였을 때 극성을 띠는 강한 공유결합을 형성한다. h-BN은 약 6.8eV의 Band gap을 가지며 이는 대부분의 일반적인 반도체를 상회한다. 이것은 강한 이온결합에 의해 질소의 p 오비탈에 의한 원자가 띠와 붕소 p 오비탈에 의한 전도띠의 에너지 차이가 크게 발생하는 것으로 설명될 수 있다. 이러한 큰 Band gap은 h-BN의 강한 절연 특성을 부여하며, 215nm 부근 Deep Ultraviolet 영역에서의 발광 관측이 가능하다. 이는 자외선발광재료로서의 h-BN의 활용도를 시사한다. h-BN은 또한 61-200kV/mm^2 범위의 높은 유전체 강도를 가진다. 따라서 높은 전기장에서도 electrical breakdown 에 의한 전류 흐름 없이 효과적인 유전체로 작용할 수 있다. 절연체의 전기적 손실도를 나타내는 유전정접에 있어서도 1 MHz에서 0.00075의 수치를 보이는 등 h-BN의 이러한 전기적/광학적 특성이 열전도성, 화학적 안정성과 더불어 광학 기기, 축전기 또는 트랜지스터의 구성 요소로써 효과적으로 작용할 수 있게 한다.

**2.2 소재 선정**

그래핀은 본 연구에서 요구되는 전자 이동도와 기계적 강도 측면에서 최적의 재료로 평가된다. 그래핀은 전자 이동 속도가 매우 빠르며, 이는 고성능 전자 소자 및 에너지 저장 장치의 효율성을 극대화하는 데 필수적이다. 이러한 전기적 특성 덕분에 그래핀은 높은 성능을 요구하는 시스템에서 중요한 역할을 할 수있다. 또한, 그래핀은 강도 면에서 탁월하며, 동시에 매우 얇고 유연한 구조를 가지고 있어 다양한 응용 환경에서 구조적 안정성을 유지하면서도 변형에 대한 내구성을 제공한다. 이러한 특성은 본 연구에서 요구되는 조건을 충족시키는 데 중요한 역할을 한다. 경제성 측면에서도 그래핀은 최근 생산 기술의 발전으로 인해 비용이 지속적으로 낮아지고 있어 연구 및 개발 과정에서 비용 효율성을 확보할 수 있다. 특히, 그래핀은 다른 고성능 재료들에 비해 상대적으로 저렴한 비용으로 뛰어난 성능을 발휘할 수 있어 본 연구에서 경제적 측면과 기술적 요구를 동시에 만족시키는 최적의 재료로 선정되었다.

결과 ( Results )

3.1 실험 및 시뮬레이션 과정

 그래핀의 높은 전자 이동도를 활용하여 고속 트랜지스터의 성능을 평가하기 위해 다음과 같은 실험과 시뮬레이션을 계획하였다.

3.1.1 그래핀 합성 및 소자 제작

 화학 기상 증착(CVD) 방법을 이용하여 단일층 그래핀을 구리 기판 위에 합성할 수 있다. 이러하게 합성된 그래핀을 실리콘/실리콘 산화막 기판으로 전이시킨 후, e-beam lithography를 활용하여 소스와 드레인 전극을 형성한다.

3.1.2 전기적 특성 측정

 드레인-소스 전압을 고정시키고, 게이트-소스 전압을 변화시키며 드레인 전류를 측정하였다. 측정된 전류 전압 특성을 활용하여 다음 (1),(2) 식에서 전자 이동도를 계산할 수 있다.

(1)$I\_{D}=$$μC\_{ox}\frac{W}{L}(V\_{GS}-V\_{TH})V\_{DS}$

식 1.

(2)$I\_{D}=μC\_{ox}\frac{W}{L}(V\_{CS}-V\_{TH})^{2}$

식에서 *μ*: 전자 이동도 (cm²/V·s), Cox​: 게이트 산화막 커패시턴스 (F/cm²), W:채널 폭 (cm), L :채널 길이 (cm), VGS​: 게이트-소스 전압 (V),VTH​: 임계 전압 (V),VDS​: 드레인-소스 전압 (V)이다.

이 식을 활용하기 위해 먼저 게이트 산화막 커패시턴스 $C\_{OX}$의 계산이 필요하다. 이는 산화막의 유전율을 산화막 두께로 나눈 것으로써 표현된다. 이로부터 전자 이동도 $μ$를 도출할 수 있다.

3.1.3 트랜지스터 동작특성 분석

 Drift-Diffusion 모델을 활용하여 그래핀 트랜지스터의 동작을 시뮬레이션하였다. 이 모델은 트랜지스터 내 전하 운반자의 이동과 분포를 정량적으로 분석하기 위한 도구로, 전류 흐름 및 전압 분포를 예측할 수 있도록 한다. 모델링 과정에서 그래핀 트랜지스터의 전자 이동도와 드레인-소스 전압의 관계를 계산하여 소자의 특성을 평가했다. 특히, 게이트-소스 전압 변화에 따른 드레인 전류의 동작 곡선을 분석하여, 임계 전압 및 트랜지스터의 선형 및 포화 영역에서의 동작을 평가하였다. 이에 있어서 고려할 물리량은 게이트-소스 전압이 특정 값을 초과할 때 드레인 전류가 급격히 증가하는 임계 전압과 전자 이동도였다.

토의(Discussion), 결론(Conclusion)

4.결과 고찰

선행 연구들로부터 그래핀 트랜지스터는 기존 대조군 실리콘 트랜지스터가 약 1,400 cm²/V·s의 전자 이동도를 보여준 것에 반해 그래핀 트랜지스터의 전자 이동도는 1,5000 cm²/V·s로 측정되며, 이는 Dirac 전자의 무질량 특성에 의한 것으로 전자가 밴드 갭 없이 에너지 준위를 가로질러 이동하기 때문인 것으로 보인다. 이러한 고속 전자 이동은 드레인 전류의 증폭과 고속 동작을 가능하게 하며, 이는 고성능 소자 설계에서 중요한 이점으로 작용할 수 있음으로 보인다.

이에서 측정한 임계 전압 또한 그래핀 트랜지스터의 경우 0.4V, 실리콘 트랜지스터의 경우 1.0V로 나타나게 되어 밴드 갭이 없는 그래핀의 특이한 전도 특성으로부터 기인하는 효과라고 보여진다. 드레인 전류 또한 같은 드레인-소스 전압 내에서 실리콘 트랜지스터 대조군보다 약 3배 이상의 전류를 발생시킴으로써, 고전류 및 고속 응용에서 큰 이점을 발휘할 것으로 기대되었다.

**5.결론 및 추후 연구 방안**

본 연구를 통해 그래핀 트랜지스터가 고속, 저전력 전자 소자에 유망한 후보임을 확인하였다. 그래핀의 높은 전자 이동도는 트랜지스터의 스위칭 속도를 향상시키고, 낮은 임계 전압은 저전력 구동을 가능하게 한다. 이러한 특성은 차세대 전자 기기의 성능 향상과 에너지 효율 개선에 기여할 수 있다.

그러나 낮은 온/오프 전류 비율은 실용화에 있어 한계점으로 작용할 수 있다. 이를 극복하기 위해서는 그래핀의 밴드갭 조절에 대한 추가 연구와 소자 구조의 최적화가 필요하다. 또한, 대면적 그래핀의 고품질 합성 기술과 대량 생산 공정의 개발도 중요하다. 결론적으로, 그래핀은 독특한 물리적 특성과 잠재력을 지닌 소재로서 전자 기기 분야의 기술 혁신을 촉진할 수 있다. 지속적인 연구와 개발을 통해 그래핀 기반 소자의 실용화를 앞당길 수 있을 것으로 기대된다. 추후 연구 방안으로 그래핀에 스트레인 적용, 나노리본화, 하이브리드 구조 형성 등을 통해 밴드갭을 조절, 다층 그래핀이나 이종 접합 구조를 활용하여 온/오프 전류 비율을 향상시키는 소자 설계가 요구된다. 또한 이의 실용화를 위해서는 위와 같이 소자 구조를 최적화한 그래핀을 합성할 수 있는 증착 기술 또는 소자 제조 공정에서의 연구가 필요하다고 생각되어진다.

REFERENCES

[1]Schwierz, F. (2010). Graphene transistors. Nature Nanotechnology, 5(7), 487–496.

[2]Lemme, M. C., Echtermeyer, T. J., Baus, M., & Kurz, H. (2007). A graphene field-effect device. IEEE Electron Device Letters, 28(4), 282–284.

[3]Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S. V., Grigorieva, I. V., & Firsov, A. A. (2004). Electric field effect in atomically thin carbon films. Science, 306(5696), 666–669.

[4]Lin, Y.-M., Dimitrakopoulos, C., Jenkins, K. A., Farmer, D. B., Chiu, H.-Y., Grill, A., & Avouris, P. (2010). 100-GHz transistors from wafer-scale epitaxial graphene. Science, 327(5966), 662.