

## ARTICLE

### Rediscovery of Copper

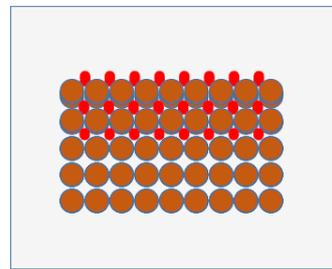
김기완, 최준혁, 최정인 (17학번)

구리는 우리의 일상 속 어디서나 찾기 쉬울 만큼, 굉장히 흔하고 접하기 쉬운 금속 중 하나이다. 또한, 청동기 시대부터 인류에게 친숙했던 구리는 그 역사가 깊다. 그런데, 광메카트로닉스공학과에는 아직까지도 구리에 대한 연구를 하시는 분이 계신다. 듣는 순간 의아해 하는 사람이 많을 것이다. 하지만, 모두가 지나친 구리에는 수많은 마법이 숨어있다. 구리, 그리고 단결정에 대한 매력에 대해 소개하겠다.

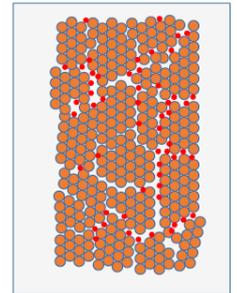
흔히들 '구리'하면 떠오르는 이미지는 붉은 빛을 띄는 갈색 혹은 산화가 된 녹슨 구리를 생각할 것이다. 구리가 여러가지 다른 색을 띌 수 있다는 것이 상상이 되는가? 구리는 전도성과 연성이 좋으며, 무르기는 하나 다른 원소를 첨가하면 단단해지는 성질을 보인다. 인류는 구리의 합금인 청동을 사용함으로써 석기 시대에서 청동기 시대라는 새로운 문명 시대를 개척하였다. 이렇듯 구리는 고대 시대에 인류의 문명 발달에 크게 기여한 금속이다. 현대사회에서도 구리는 여러 용도로 중요하게 사용된다. 전선, 송수관, 지붕 재료, 자동차 라디에이터 등 기계 장치의 부품 등으로 널리 사용된다.

정세영 교수님의 일반물리나 현대물리를 수강한 학생이라면 누구나 '단결정'에 대해 들어보았을 것이다. 에디슨 시절이 구리의 전성기였다면, 기술의 발전과 함께 첨단 소재가 쏟아져 나오면서 구리는 그저 전류만 잘 흘리는 재미없는 도체로 전락했다. 하지만, 이 구리를 단결정으로 만드는 것이 가능해지면서 최근 다시 주목받기 시작했다. 구리 원자를 하나하나 차곡차곡 쌓아 올린다면 어떤 일들이 벌어질까? 지금부터 단결정의 매력에 대해, 첨단 소재에 대한 열망이 어떻게 단결정화 기술에 접목되는지 알아보겠다. 이 기술은 본과의 정세영 교수님이 전 세계 유일의 기술을 갖고 있다.

먼저 소개하고자 하는 바는 'Copper Oxide'이다. 주변에서 산화가 되어 녹슨 구리를 본 적이 없는 사람은 없을 것이다. 산소의 산화과정을 보면 산소는 표면에서 100도 정도의 높은 온도에서 이온화가 이루어지는데, 구리 표면에서는 그냥 닿기만 해도 이온화가 이루어져 구리는 잘 녹슨다. (구리의 격자 구조(lattice structure)를 살펴보면 6개의 near neighbor로 결합하고 표면에는 Dangling bonds가 존재한다. Dangling bond는 촉매작용을 하기 때문에 산소가 닿았을 때 이온화될 가능성이 매우 높다.) Polycrystal에서는 수많은 grain boundary가 존재해 이온화된 산소가 lattice structure내부로 침투하기 쉽다. 하지만, Single crystal에서는 defect가 존재하지 않기 때문에 이온화된 산소가 lattice structure내부로 침투하기가 어렵고 격자구조를 변형시키는 에너지가 너무 높아 산화가 잘 일어나지 않는다.



oxidation process in SCCF



oxidation process in PCCF

그림1. 단결정구리와 다결정구리에서의 산화에 대한 개략도

즉, 단결정 구리는 상온에서 녹이 잘 슬지 않는다. 구리 단결정을 강제로 산화 시키려면 구리결정의 표면 한 층을 동시에 산화 시키면 된다. 200도 정도의 온도로 열을 가해주면 lattice vibration이 생기고 이 방법을 통해 무작위의 산화가 아닌 controllable oxidation이 가능해진다.



그림2. 시료 용기에 들어있는 구리들

그림2.에 보이는 다양한 색의 sample들이 모두 구리다. 구리로 다양한 색을 발현한다는게 무슨 의미가 있을까? 상업적으로, 또는 연구적으로 어떤 효과를 불러올 수 있을까?

Vanta black이란 빛을 99.96% 흡수할 수 있어 세상에서 가장 진한 검은색을 내는 신물질이다. 앞서 산화를 통해 다양한 색을 만들었던 것과는 달리 구리 표면 구조를 제어하여 Black copper를 만들 수 있다. Black copper는 가시광선 영역의 빛을 모두 흡수해 검정색을 띄는데, IR영역의 빛은 반사한다. Infrared ray는 가시광선이나 자외선에 비해 강한 열작용을 가지고 있는 것이 특징인데, 이 black copper로 소자를 만들면 열은 흡수하지 않지만 검고 전류를 잘 흘리는 소재를 만들 수 있다. 또한, black copper에서는 계면특성을 조절할 수 있다. Black copper는 superhydrophobic한 성질을 갖는데,



UV를 쬐어주면 superhydrophillic하게 된다. 열을 가하면 본 상태로 다시 돌아올 수 있다. 이처럼, 계면 특성을 조절할 수 있게 되면 micro fluidic application등 다양한 응용이 가능하다.

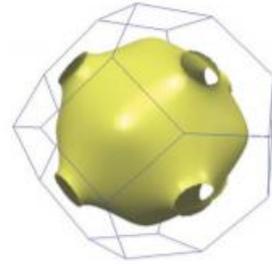
그림3. Black copper의 앞면과 뒷면

## 구리로 반도체를 만들 수 있다?

다들 알다시피 구리는 금속이다. 금속의 band structure를 살펴보면 Fermi surface가 밴드 중간에 있어 valence band minimum에 hole을 갖거나 conduction band minimum에 electron carrier를 갖는 반도체와는 다르다. 금속의 전자는 자유전자의 형태로 존재한다.

Carrier type은 electron이나 hole이냐에 따라 나뉘어진다. 구리는 금속이기 때문에 전자가 carrier이다. 하지만 구리가 2D가 되어 두께가 얇아지고 MFP(Mean free path, 평균자유행로)가 충분히 길어진다면 금속에서도

hole의 거동을 관측할 수 있다. Fermi surface가 어떻게 생겼는지 관찰하면 물질의 특성을 알 수 있는데, 구리의 Fermi surface를 보면 MFP가 길어지면 hole orbit이 가능해지고, 박막을 아주 얇게 2D material로 만든 뒤



grain boundary와 같은 결함이 없는 아주 고품질 단결정 박막을 만들면 hole의 거동이 가능해진다.

그림2. Fermi surface of copper

전자들이 충돌없이 아주 먼 거리를 이동할 수 있고 전자가 높은 coherency를 가지면 예상치 못한 새로운 물성을 보게된다. 구리의 구조와 차원을 잘 설계하면 전류가 흐르는 방향에 따른 저항 특성을 다르게 할 수 있다. 이것은 원래 반도체에서나 가능한 일이다. 금속 design만으로 반도체를 구현할 수 있게 된다면, 반도체 산업에 큰 혁명을 이룰 수 있을 것이다.

구리가 가진 가장 문제점인 산화를 완벽하게 제어할 수 있고 가장 좋은 장점인 전기적 특성을 10-100배 더 좋게 만들 수 있다면 재료공학적 측면과 물리적인 측면에서 큰 가치가 있다고 생각이 된다. 정세영 교수님은 남들이 잘 하지 않는 구리에 대해 오랜 기간 연구해 오면서 알려지지 않는 새로운 물성들을 밝혔고 현재에도 이 분야 연구에 집중하고 계신다.

References)

[1] Su Jae Kim *et al.*, and Se-Young Jeong, **Color of Copper/Copper Oxide**, Adv. Mater. 33, 2007345 (2021)

[2] S. H. Chew, Se-Young Jeong, *et al.*, and Seung chul Kim, **Large-area grain-boundary-free copper films for plasmonics**, Applied Surface Science 521 (2020) 146377

[3] 금속의 재발견: 금빛보다 아름다운 구리의 빛깔

Horizon, Se Young Jeong

## ARTICLE

### Multi-layered Graphene

김기완, 최준혁, 최정인 (17학번)

TMD(전이금속 칼코겐 화합물)는 반도체적 성질을 가지면서 원자 한층으로 조절이 되기는 하는데 아직 크게 성장하는 기술이 부족합니다. 그러던 차에 그래핀을 두 층 겹치면 band gap이 형성되는 것으로 보고가 되었고 그에 따라 많은 연구가 진행되고 있습니다.

보통 반도체에서 사용하는 band gap은 1eV에서 3eV 영역대까지 존재합니다. 그러나 그래핀의 band gap은 아직 작아서 높은 mobility를 유지하면서 반도체적 성질도 활용하기 위해 multi layered graphene에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있습니다.

정세영 교수님 연구실에서는 기존의 sputter system의 배선을 단결정 배선으로 교체해 노이즈를 없애고, target으로 단결정을 사용하고 이를 통해 완벽한 기판물질인 단결정 구리 박막을 성장함으로써 최고급 품질의 graphene을 만들어낼 수 있습니다. 세계 최초로 2inch의 크기로 graphene을 만드는데 성공하셨고, graphene을 1-4층까지 uniform하게 control하는 논문도 Nature 자매지인 Nature Nanotechnology에 실으셨습니다. Graphene을 4층까지 쌓았을 때 어떤 물성이 나오지는 아직 연구가 더 필요하나, 예상과 다르게 hexagonal이 아닌 rhombohedral 구조로 쌓이는 것이 관찰되었습니다.

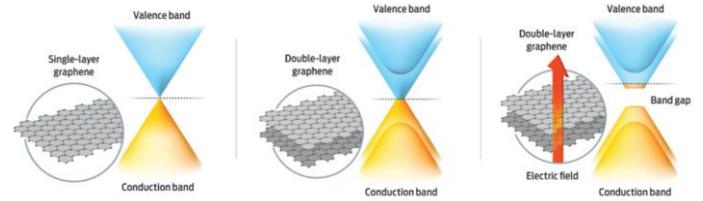


그림4. Band gap formation of BLG

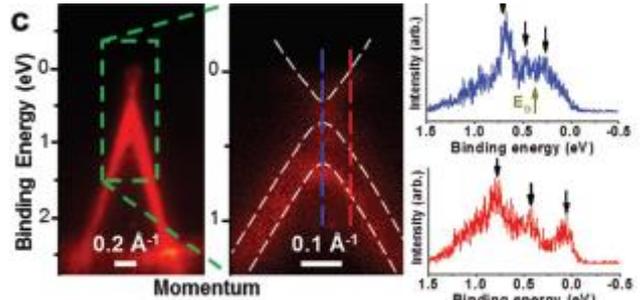


그림5. ARPES intensity mapping near the K-point for AB-BLG

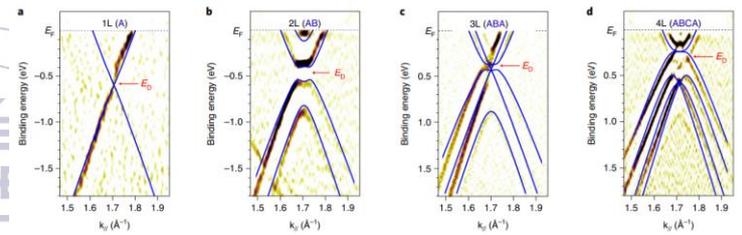


그림6. Nano-ARPES spectra recorded at the high-symmetry K point along the  $\Gamma$ -K direction.

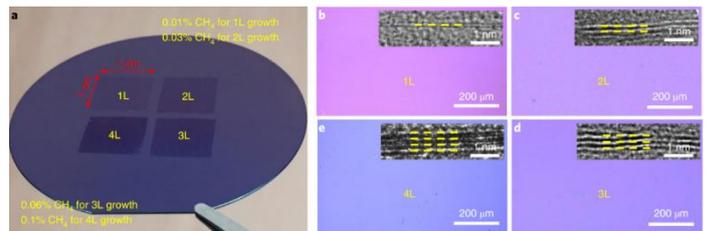


그림7. Layer-controlled single-crystalline graphene film (mono-tetralayer)

Graphene 특히 고품질 seamless graphene을 이용하면 집적회로의 소형화와 band gap의 조절이 가능할 것이고, 고집적 전극의 제작으로 더 싸고 빠른 소자를 만들 것으로 기대됩니다. 또한 나노화된 부품으로 더 복잡함에도 더 정확한 기능을 하는 소자를 개발하게 될 날이 머지 않았음이 느껴집니다.

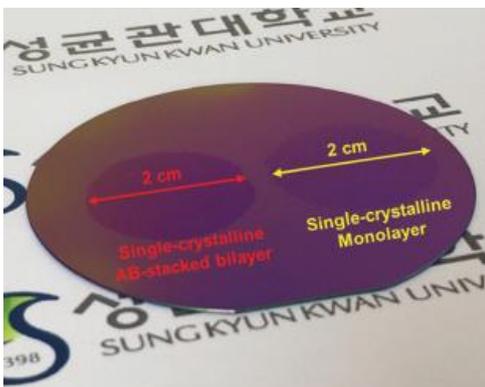


그림3. Photo graph of single-crystalline AB-BLG and MLG of 2cm in diameter each

References)

[1] V.L. Nguyen, Se-Young Jeong, *et al.*, and Y.H. Lee, **Wafer-Scale Single-Crystalline AB-Stacked Bilayer Graphene.** *Adv. Mater.* 28, 8177-8183 (2016)

[2] V.L. Nguyen, Se-Young Jeong *et al.*, and Y.H.Lee, **Layer-controlled single-crystalline graphene film with stacking order via Cu-Si alloy formation.** *Nat. Nanotechnol.* 15, 861-867 (2020)

이 달의 교수님, 정 세 영 교수님

지금의 광메카트로닉스공학과가 있기까지 열심히 노력 해주신 모든 교수님들께 감사를 표하며 7월의 교수님,

정세영 교수님과 진행했던 인터뷰 내용을 전합니다.

Q. 최근 교수님께서 진행하고 계시는 주력 연구는 어떤 것인가요?

A. 최근 제가 주력하고 있는 연구는 크게 두 가지로 나눌 수 있습니다. 주력 연구를 말하기에 앞서, 제 연구실에는 시중의 판매되는 Sputter system 장비를 구리 단결정 기술을 접목시켜 개조한 장비가 있습니다. 단결정 구리를 이용한 배선을 사용하여 noise를 줄이고, 장비내의 타겟을 단결정으로 교체하면 그래핀 바운더리가 없어서 덩어리가 떨어지지 않고 특정한 조건에서 원자가 1개씩 떨어져 나오게 할 수 있는 즉, defect가 존재하지 않는 최상의 film을 얻어낼 수 있습니다. 최근 은 박막을 완벽한 단결정으로 만드는 연구에 성공했습니다. 기존에 사파이어 기판이나 다른 기판 물질위에 은 박막을 성장하면 격자 상수가 다르기 때문에 잘 자라지 않고 기판으로 분리가 되는데 완벽한 표면을 가지고 있는 구리 단결정에 이론적 원자구조 모델을 적용하여 성장하면 은의 결정 구조를 전혀 방해하지 않고 완벽하게 성장할

수 있습니다.

또한 구리의 색 발현에 대한 연구를 하고 있습니다. 우리가 흔히 보는 구리는 산화되어 있기에 색이 별로 이쁘지 않았으나 단결정 구리로 색을 구현하면 금보다 이쁘게 만들 수 있습니다. 표면처리를 잘 하면 고온에서도 산화되지 않게 할 수 있습니다. 우리 연구실에서는 원자 한층만 바뀌어서 산화되지 않게 하는 방법을 개발하였고, 400도까지 열을 가해도 산화가 되지 않고 상온에서는 거의 영구적으로 산화되지 않는다고 할 수 있습니다. 구리가 단결정이 되면 여러가지 다른 물성들이 나타나는데 특히 nanoscale에서는 전자들의 평균자유행로(MFP)가 많이 달라지기 때문에 금속의 특성이 많이 바뀌게 되는데 이러한 연구를 주로 하고 있습니다.

Q. 다소 민감한 질문일수 있지만, 그래핀이나 CNT와 같은 차세대 소자가 각광받고 있는데 구리 박막을 연구하시게된 계기는 무엇인가요?

A. 그래핀과 CNT분야는 여러 다른 저명한 교수들이 치열하게 연구하고 있는 것 같습니다. 제가 성향상 남들과 경쟁하여 시간이나 여타 다른 것들에 쫓겨 결과물을 빨리빨리 내기보다는 시간이 좀 걸리더라도 더 좋은 결과물을 내는 연구를 하는 연구자가 되고 싶습니다. 그래서 많은 사람들이 치열하게 경쟁하는 마당에 끼어들기 보다는 역으로 많은 사람들이 필요로 하는 것이 무엇일까를 생각했고 우연히 그래핀을 키우는 사람들을 위한 기판인 구리 박막을 만들기 시작했고, 지금은 다양한 분야와 협업하고 있습니다. 구리를 main으로 연구하는 사람은 10년전만 하더라도 저 밖에는 없었는데 지금은 전세계적으로 큰 그룹에서 구리 단결정 연구를 하고 있어서 구리가 재발견되고 있구나 생각하고 있습니다.

처음에 구리를 연구할 때는 다른 연구자들의 관심을 끌기가 쉽지 않았고 좋은 논문을 적는 것도 어려웠습니다. 그러나 하고 싶은 연구를 하고, 그에 맞는 결과를

냈을 때 평가는 바뀌게 됩니다. 학생들에게 해주고 싶은 말은 뭔가 자기가 좋아하는 일에 몰입해서 열심히 하는 것이 중요하다는 생각이 듭니다. 돌아보면 다소 연관이 없어 보였던 일이 뒤에 큰 도움을 주기도 합니다.

Q 교수님의 전공이신 결정학에 대해 광메카트로닉스공학과 학생들에게 소개 부탁드립니다.

A. 결정학은 원자들이 주변에 있는 다른 원자들과 어떻게 어울리느냐를 공부하는 학문입니다. 1 cm<sup>3</sup>의 결정내에 있는 원자수는 약 10<sup>21</sup>개가 넘으므로 모든 원자들을 들여다 볼 수는 없고 가장 작은 단위 구역만 보면 전체를 알 수 있습니다. 결정학 분야에서 노벨상이 40번 넘게 나올 정도로 중요한 영역이면서도 재미있는 분야입니다.

Q 교수님의 최종목표는 무엇인가요?

A. 연구를 하는 학자로서의 최종목표는 결국 좋은 논문을 발표하는 일일 것입니다. 그 분야를 연구하는 모든 사람이 인용하는 그런 논문을 퇴직하기 전에 적어도 한 편 정도 발표하는 것 그것이 최종목표가 아닐까 싶네요.

Q. 광메카트로닉스공학과 학생들에게 해주고 싶은 말씀은 무엇인가요?

A. 우리 광메카트로닉스 학과 학생들은 두가지의 양면을 가지고 있습니다. 어떤 때는 매우 자신감에 차있고 저돌적이다가 어떤 때는 다소 기가 죽고 자신감을 잃는 모습입니다. 자신감은 "힘을 내자. 으샤으샤 하자"고 외친다고 나오는 것이 아니고 자신 내부에 싸여진 지식들에서 나옵니다. 학부 과정 동안에 쌓을 수 있는 지식은 학부때 밖에 할 수 없으니 즐기면서 자신을 채워가는 방법을 각자 잘 찾아보기 바랍니다.

