

전동기 권선용 그래핀 와이어 기술 연구 동향

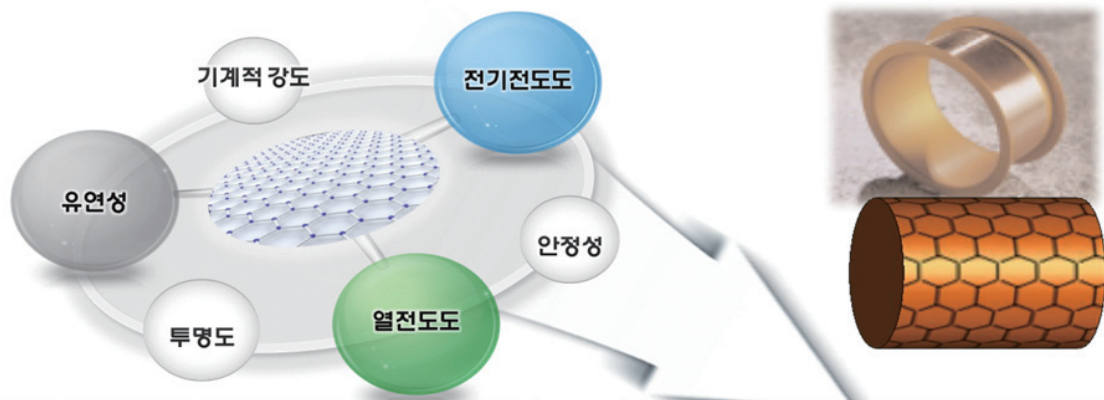
최동수, 양우석, 유세현, 김형근 | 전자부품 연구원

1. 서론

의료용

에서 실생활에 이르기까지 휴대가 간편하고, 옷처럼 입을 수 있는 유연한 미래형 전자제품들에 대한 요구는 나날이 증가하고 있다. 이에 따라 쉽게 구부러지는 유연한 전자소재에 대한 연구들 또한 활발하

게 진행되고 있다. 이러한 미래형 전자 디바이스들의 구동에 있어서 가장 중요한 핵심 중의 하나는 모터라고 할 수 있다. 모터(전동기)의 사이즈를 축소하고 경량화하면서 전기적 특성을 향상시키는 연구가 병행되지 않고서는 아이언맨 슈트와 같은 미래형 전자소자의 구현은 요원하다고 해도 과언이 아닐 것이다. 동손 (copper loss)은 모터에서의 중요한 손실 중의 하나이다. 전도율이 높은 와이어를 사용하면 동손을 줄임으로써



구리와이어 성능 향상을 위한 그래핀 특성 적용

- 전하이동도 ($\sim 200,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ @ RT)
- 전기전도도 ($1.0 \times 10^{-6} \Omega \text{ cm}$)
- 전류밀도 ($\sim 10^9 \text{ A/cm}^2$)
- 열전도도 ($5,300 \text{ W/m} \cdot \text{K}$)
- 탄성계수 ($1,000 \text{ GPa}$)



신개념 권선 제조기술

- 동선 전류밀도 향상 (전도도 개선)
- 내화학-내부식 특성 향상 (그래핀 배리어)
- 단면적 감소에 따른 경량화 (슬림, 고점적률)
- 구조설계 자유도 증대 (굴곡면 처리 용이)
- 저가격, 대량생산 기술 확보(가격 경쟁력)

그림 1. 그래핀의 물성과 권선 제조기술

모터 전체의 효율을 상승 시킬 수 있고, 와이어의 면적의 감소를 유도할 수 있어 모터의 크기를 축소하고 경량화하는데 기여할 수 있다. 이에 그래핀 와이어 응용기술이 주목받고 있다.

그래핀은 1940년대부터 이론적인 연구가 진행 되어왔으나[1] 실험적으로 그래핀을 얻어내기까지는 60년 이상 걸렸다. 2004년 맨체스터 대학교의 Geim과 Novoselov 교수는 스카치테이프를 이용하여 흑연에서 그래핀을 분리해 내는 실험에 성공하였고[2] 그 업적으로 노벨 물리학상을 수상하였다. 그래핀의 연구는 미국과 한국이 선두적 역할을 수행하고 있으며 최근에는 영국을 중심으로 유럽 전역으로 확대되고 있다. 그래핀의 산업화 측면에서, 초기에는 Angstrom Materials, Vorbeck Materials, XG Sciences와 같은 미국의 회사에서 작은 면적의 그래핀 플레이크를 대량 생산하는 것으로 시작되었으나[3], 현재는 세계 전역에 있는 기업들이 그래핀 연구개발 및 생산에 참여하고 있다. 생산하는 그래핀의 종류도 그래핀 플레이크에서 부터 고품질의 대면적 그래핀 박막까지 그 영역이 확대되고 있다. 특히 중국은 연간 CVD 그래핀 생산량 규모를 110,000m² 수준으로 공격적 투자에 나서고 있다[3].

그래핀이 주목받는 이유는 물리 화학적인 물성이 매우 뛰어난 2차원 물질로 미래형 소자에 적합하기 때문이다. 그래핀은 전자 이동도가 실리콘에 비해 100배, 전류밀도는 금속보다

100배, 열전도도는 구리에 비해 10배 가량 높은 물질이다[4]. 산업현장에서 대면적의 고품질 그래핀을 생산하기 위한 방법으로 화학 기상 증착 (Chemical Vapor Deposition: CVD) 방법이 있다. 이것은 구리박막과 같은 금속촉매 위에 탄소성분이 있는 반응 기체를 주입시켜 고온 환경에서 금속 박막 위

구리박막과 같은 금속촉매 위에 탄소성분이 있는 반응 기체를 주입시켜 고온 환경에서 금속 박막 위에 탄소원자가 증착되어 그래핀을 얻어내는 Bottom-Up 방식

에 탄소원자가 증착되어 그래핀을 얻어내는 Bottom-Up 방식이다. 이 방법은 균일한 고품질의 그래핀 박막을 얻을 수 있기 때문에 주로 터치패널이나 유연한 디스플레이에

적용할 수 있는 투명 전도성 박막을 제조하기 위해 사용된다.

본 기고문에서는 CVD 제조방법을 이용한 그래핀 와이어 제조기술을 제안하였다. 이 공정은 구리 와이어 위에 그래핀을 성장시키는 방식으로, 와이어를 둘러싸는 그래핀 코팅막이 직접적으로 형성되므로 별도의 추가 공정 없이 그래핀 와이어를 제조할 수 있는 기술이다. 또한 제작된 그래핀 와이어의 전기적 특성 향상을 확인함으로써 초소형 경량 모터에 응용할 수 있는 가능성을 제시하였다.

2. 본 론

2.1 금속선위의 그래핀 코팅 제조 연구 동향

우리나라의 경우, 2006년 이후 극세경 동축케이블의 제조와 그래핀 합성 기술에 대한 특허를 시작으로 최근 그래핀 코팅

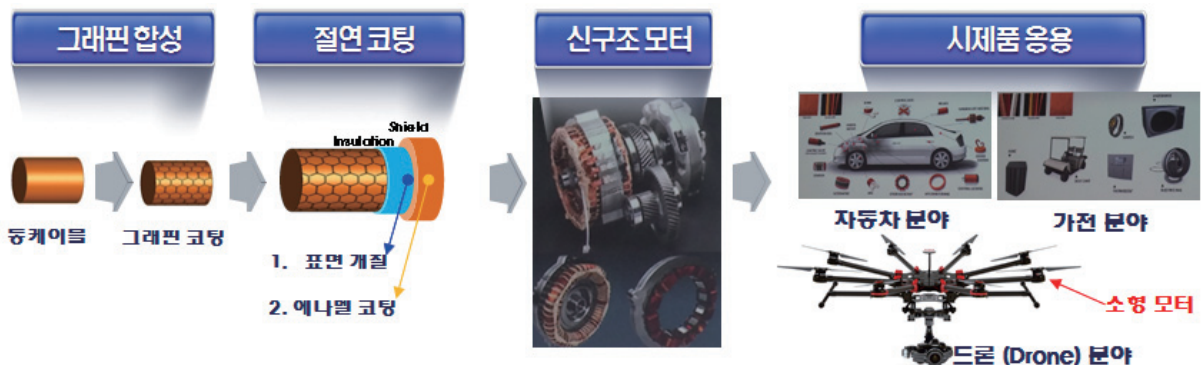


그림 2. 그래핀 와이어제조 및 응용

층을 가지고 있는 동축 케이블에 대한 특허들이 출원되고 있다. 특허의 내용은 금속선위에 전기도금, CVD방법, 폴리머 코팅 후 마이크로파 조사 등의 방법으로 그래핀을 코팅하는 제조 기술을 핵심으로 하고 있다. 그래핀 제조 기술과 그래핀 와이어 제조에 대한 기술권을 선점할 수 있다면 우리나라가 학문적인 연구 영역 뿐 만 아니라 산업적 영역에서도 그래핀 강국의 자리를 굳건히 할 수 있을 것으로 기대된다.

그래핀은 0.34nm정도의 얇은 2차원 물질이기 때문에 금속 촉매 위에서 그래핀을 제조하고 금속 박막을 식각해 낸 후 그래핀을 다양한 기판위에 전사하는 형태로 사용되어져 왔다. 이 경우, 식각이나 전사과정에서 그래핀이 손상을 입어 그 물성이 저하 될 수 있다. 그러나 구리를 사용하는 전기회로에서 그래핀이 코팅된 구리를 사용하면 그래핀 성장 후 추가적인 공정이 필요하지 않다. 또한 그래핀 물성의 저하도 최소화 될 수 있고 제조시간과 단가의 절감을 가져올 수 있다.

그래핀이 코팅된 구리 와이어를 사용할 경우, 와이어의 전기적 특성 향상과 구리의 산화를 지연시키는 효과를 기대할 수 있고 모터에도 응용이 가능하다. 대형 모터에서 사용하는 구리 케이블의 경우 얇은 그래핀의 코팅효과가 미비할 수 있다. 그러나 구리 나노 와이어의 경우, 그래핀의 코팅 유무에 따라 저항 변화와 열전도도의 향상, 절연파괴전류밀도 (breakdown current) 향상에 대한 연구 보고들이 있다[5-6]. 또한, 2015년 Y. Ahn et al은 그래핀을 코팅할 경우, 그래핀에 의한 전기적 특성 향상과 더불어 산화방지효과를 있음을 발표하였다. 구리 나노 와이어를 2일간 방치할 경우 산화에 의해 면저항이 1,800 배나 높아지는 것에 반해, 그래핀을 하이브리드 한 경우, 면저항의 강하가 30일간 9% 이내로 낮아진 실험을 통해 그래핀의 산화 방지막 효과를 증명하였다[7]. 이러한 최근 연구들은 주로 전기회로 내의 구리 나노 와이어를 모체로 사용하였다.

본 내용에서는 휴대폰이나 무인 항공기 드론 (Dron)에서 사용하는 초소형 경량 모터용 극세선 구리 와이어를 촉매로 하여 그래핀 와이어를 제조하였다.

2.2 그래핀 와이어 전류밀도의 이론적 추정

그래핀이 코팅된 구리 와이어의 전류 밀도를 다음 식(1)에 의해 이론적으로 예측해 보았다.

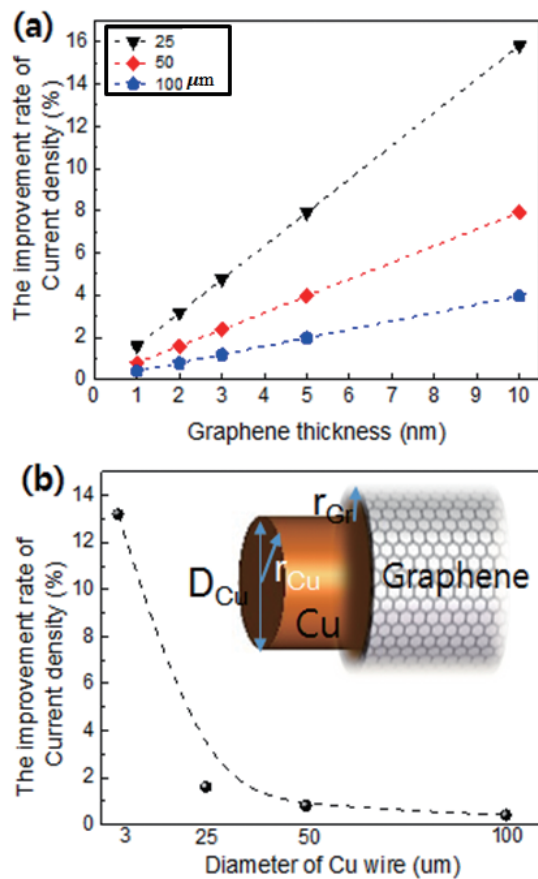


그림 3. 그래핀 와이어의 전류밀도 변화

$$J = J'(A' + \frac{\sigma}{\sigma'} A) / (A' + A) \quad (1)$$

여기서, J 는 그래핀이 코팅된 구리 와이어의 전류 밀도, J' 는 구리 와이어의 전류 밀도, A 는 코팅된 그래핀의 단면적, A' 는 구리 와이어의 단면적, σ 는 그래핀의 전도도 (비저항의 역수), σ' 는 구리의 전도도이다.

식 (1)을 이용하여 그래핀 와이어의 전류 밀도의 향상률을 추정할 수 있다. 그림 3(a)는 코팅된 그래핀의 층수가 증가할수록 그래핀 와이어의 전류밀도가 증가됨을 보여준다. 그림 3(b)는 단일층 그래핀이 코팅된 경우, 구리 와이어의 직경에 따라 전류 밀도가 얼마나 향상될 수 있는지 계산한 것이다. 구리 와이어의 직경이 작아질수록 그래핀 코팅에 의한 전류밀도 향상효과가 크게 나타날 것으로 예측할 수 있다.

2.3 그래핀 와이어 제조 기술

금속 촉매를 이용하여 화학기상증착방법을 이용한 그래핀

제조 기술은 2009년부터 개발되어 왔다[8-9]. CVD 방법의 제조 연구가 발표된 이래, 촉매의 종류, 표면조도, 반응기체와 유량비, 반응온도 등 다양한 공정과정에서 최적화 연구가 진행되어 오고 있다.

그래핀 제조에 사용되는 금속 촉매의 경우, 초기에는 니켈 박막을 사용하였으나, 단일층 그래핀 제조를 위해 최근에는 구리박막을 촉매로 사용하는 것이 일반화되었다. 본 내용에서는 이 점에 착안

하여 극세선 구리 와이어 표면에 그래핀이 코팅된 형태의 그래핀 와이어를 제조하였다.

구리의 융점에 가까운 고온의 그래핀 제조 온도에 장시간 노출 될 경우 잠열로 인하여 와이어가 단절되는 부분이 발생

2.3.1 CVD 그래핀 제조 장비 및 실험 방법

그림 4를 보면, 고속 열-화학기상증착(Rapid Thermal Chemical Vapor Deposition: RT CVD)와 기존의 T CVD의 공정과정을 비교할 수 있다. 대면적 구리 박막과 달리 직경이

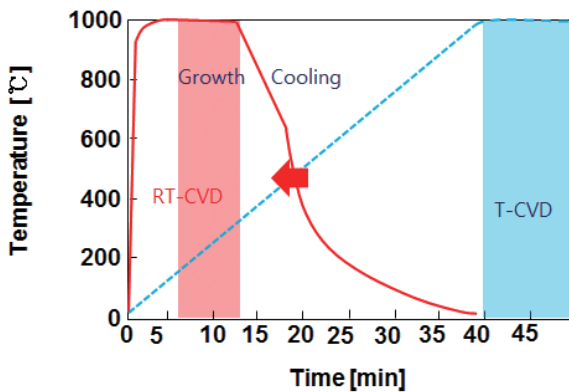


그림 4. 그래핀 공정조건

가는 극세선 구리 와이어를 촉매로 사용할 경우, 구리의 융점에 가까운 고온의 그래핀 제조 온도에 장시간 노출 될 경우 잠열로 인하여 와이어가 단절되는 부분이 발생할 수 있다. 따라서 그래핀 와이어를 제조 시 승온 속도를 최대한 빨리하여 잠열의 영향을 줄일 수 있는 RT CVD 방식을 이용하는 것이 적절하다. RT CVD 그래핀 제조 장비를 이용하여 공정압력 90 mTorr 에서 CH_4 (30 sccm: standard cubic centimeter per minute)을 주입하면서 가열하였다. 1000°C 까지 승온하는데 T CVD에 비해 10배 이상 빠른 5분가량 소요되었다. 온도와 압력을 일정하게 유지하면서 약 8분간 그래핀을 성장시켰다. 마지막으로 그래핀이 성장된 구리 와이어에 N_2 (10,000 sccm)를 공급하면서 냉각시켰다.

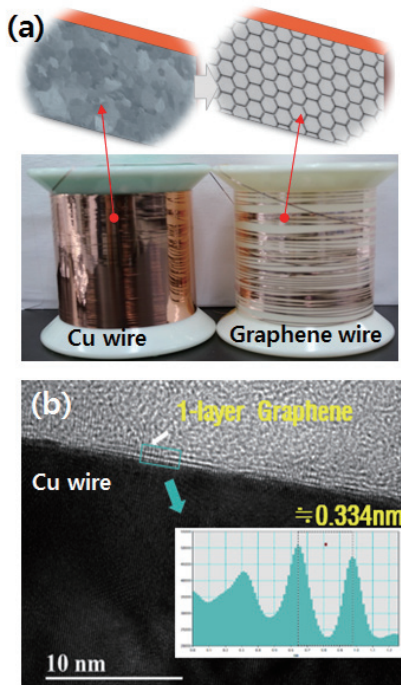


그림 5. 그래핀 와이어의 표면 분석

2.3.2 그래핀 와이어 제조 및 표면 분석

그림 5(a)는 구리 와이어 위에 단일층 그래핀을 코팅하는 방법으로 제조된 그래핀 와이어의 표면 상태를 도식화한 것이다. 구리의 융점이 그래핀의 제조 온도인 1000°C 근처 이므로 열에 의한 구리의 결정립의 크기와 방향, 강도, 표면조도, 전기적, 열적 특성의 변화를 수반하게 된다[8-9]. RT CVD 방식을 이용하여 제조된 그래핀 와이어의 상태를 TEM 사진으로 확인할 수 있다. 구리 와이어 위에 약 0.334 nm 두께의 그래핀 층이 코팅되어 있음을 확인하였다. (그림 5(b))

2.4 그래핀 와이어 물성 평가

라만 분광법은 그래핀의 품질을 평가하는 가장 손쉬운 방법이다. 그러나 극세선 구리 와이어의 경우 곡률이 크기 때문에 라만분광기를 이용하여 스펙트럼을 측정할 경우, 와이어의

단차로 인해 정확한 그래핀의 품질을 평가하기 어렵다. 따라서, 평각 구리 와이어를 이용하여 같은 조건으로 그래핀 코팅 막을 제조한 후 그래핀 품질을 평가하였다. 또한, 그래핀 와이어의 전기적 특성을 평가하기 위하여 4-probe 측정 방법으로 전류(I)와 전압(V)의 변화를 측정하였다.

2.4.1 라만 분광기 분석

라만 스펙트럼에서 나타나는 G, 2D 피크(peak)의 위치 및 반치반폭(full width half maximum: FWHM)을 통해 결정성을 확인하였고, 결합의 정도를 D 피크의 강도를 통해 확인

그래핀을 제조하는 공정에서 열적 어닐링 과정을 거치게 되므로 구리 결정립 크기가 증가하면서 저항 개선 효과가 나타난 것으로 예측

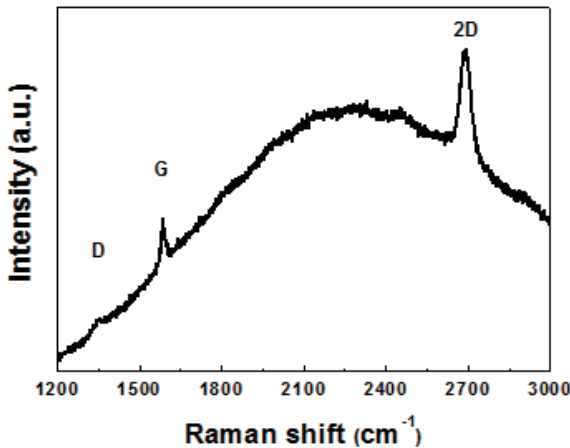


그림 6. 라만 분광법에 의한 분석

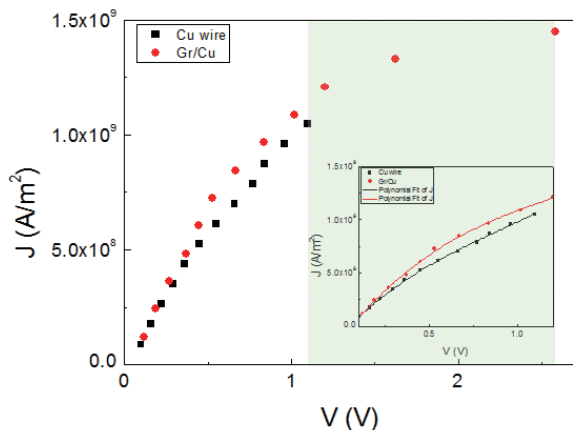


그림 7. 그래핀 와이어의 전류밀도

하였다 [10]. 그림 6에서 보여주는 바와 같이 G와 2D 피크의 강도와 위치를 통해 고품질 단일층 그래핀이 잘 성장되었음을 확인할 수 있다.

2.4.2 전기적 특성 평가

그래핀의 전류밀도는 이상적으로 구리의 100배 정도로 큰 값을 가지는 것으로 알려져 있다[6]. 그러나 제조되는 CVD

그래핀의 경우, 이론적인 값의 전류밀도를 얻기는 어렵다. 그럼에도 불구하고 실험적으로 얻어진 그래핀 와이어의 전류밀도는 극세선 구리 와이어에 비해 대략 10% 정도의 향상률을 보여주고 있다 (그림 7). 그 이유는 구리의 결정립 크기


(grain size) 성장, 구리 와이어에서 일어나는 전자의 산란[5], 그래핀 품질 등에서 찾을 수 있을 것으로 예상된다. 첫 번째로, 그래핀을 제조하는 공정에서 열적 어닐링 과정을 거치게 되므로 구리 결정립 크기가 증가하면서 저항 개선 효과가 나타난 것으로 예측할 수 있다. 두 번째로 그래핀이 코팅된 경우, 부분적인 탄성산란이 일어나는 데 반해 그래핀이 코팅되지 않은 경우 표면에서 전 방향으로 비탄성 산란이 발생하기 때문이다 [5]. 세 번째로 고품질의 그래핀은 전기적 특성이 좋기 때문에 높은 전류 밀도 향상을 기대할 수 있다.

3. 결 론

초소형 경량 전동기(모터)의 필요성이 대두되면서 모터의 권선용 재료로 극세선 구리와이어가 사용되고 있다. 권선용 와이어의 경량화와 전류밀도의 향상은 모터의 효율을 높이기 위해 필요하다. 본 내용에서는 극세선 구리 와이어에 CVD 그래핀을 코팅하는 방법으로 고품질의 그래핀 와이어를 제조하여 기존 극세선 구리 와이어에 비해 전류밀도가 향상됨을 확인하였다.

추가적으로 그래핀 와이어의 전기적 특성 향상을 위하여, 그래핀 코팅 시 구리 와이어의 결정립의 크기, 표면조도 및 결

정립계 주변의 역학 관계를 면밀히 분석할 필요가 있다. 구리 합금 등 전기적 특성이 좋은 다양한 구리 와이어를 촉매로 연속적으로 그래핀을 제조하고 표면처리를 할 수 있는 공정 장비를 고안하고 고품질 그래핀 제조를 위한 조건들을 최적화 한다면 고성능의 그래핀 와이어 상용화는 가능할 것으로 기대된다.

본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.
(No. 20122010100130) 

참 고 문 헌

- [1] P.R.Wallace, Phys. Rev. 71, 662-634, 1947
- [2] K.S.Novoselov, et al. Science 306, 666-669, 2004
- [3] R.Wencai, et al. Nat. Nanotech. vol 9 October 2014
- [4] A.K.Geim, Science 324, 1530-1534, 2009
- [5] R.Mehta, et al. Nano Lett. 15, 2024-2023, 2015
- [6] P.Goli et al. Nano Lett. 14, 1497-1502, 2014
- [7] Y.Ahn et al. ACSNano 9, 3, 3125-3130, 2015
- [8] S.Bae, et al, Nat. Nanotech. 5, 574, 2010
- [9] X.Li et al. Science, 324, 1312-1314, 2009
- [10] A.C.Ferrari, et al. Phys. Rev. Lett. 97. 187401. 2006