



즉시 보도(2019. 4. 10.)

문의: 화학부 정연준 교수(02-880-4085, yjjung@snu.ac.kr)
 연구책임자(교신저자): 정연웅 교수(UCF), 정연준 교수(서울대),
 이관형 교수(서울대), 정희석 박사(KBSI)
 연구진: 한상섭 연구원(서울대 및 UCF, 제 1저자) 외 13인

[UCF-서울대-KBSI 국제공동연구팀]

**새로운 2차원 물질의 대면적 합성, 구조-전기적 특성
 규명 및 고신축성 유연소자 개발 성공**

- ACS Applied Materials & Interfaces 저널 표지 논문 선정 -

□ 내용

- 2차원 전이금속 디칼코게나이드(Transition Metal Dichalcogenide, TMD)는 몰리브데넘(Mo), 텅스텐(W) 등의 전이금속 원소와 셀레늄(Se), 황(S) 등의 칼코젠 원소가 MX_2 (M=전이금속, X=칼코젠 원소)의 형태를 이루는 새로운 2차원 나노물질이다. 2차원 TMD는 쌓여진 층수에 따라 에너지띠 (energy band) 구조가 변화하여 전기적 특성이 달라지는 성질을 나타내며, 이에 따라 다양한 형태의 소자로 활용하기 위한 활발한 연구가 진행되고 있다.
- 특히, 백금(Pt)과 셀레늄(Se)으로 이뤄진 2차원 $PtSe_2$ 물질은 높은 전하 운반자 이동도와 높은 안정성, 그리고 박막 층수에 따라 도체와 반도체 성질을 부여할 수 있어서 다양한 전자 장비로의 활용이 기대되나, 재료의 특성 및 결정 구조에 대한 명확한 이해가 부족하여 활용 면에서의 한계가 존재해왔다.
- 본 연구는 미국 센트럴 플로리다 대학교(UCF) 재료공학부 정연웅 교수의 주도 하에 서울대 화학부 정연준 교수, 재료공학부 이관형 교수(전 연세대 신소재공학과), 한국기초과학지원연구원(KBSI) 전주센터 정희석 박사간 공동연구로 진행되었다.

- 센트럴 플로리다 대학교 정연웅 교수 연구팀은 화학 증기 증착법(CVD)을 이용하여 다양한 두께와 형태를 갖는 2차원 PtSe₂ 물질의 대면적 합성에 성공하였으며 PtSe₂ 물질이 수평에서 수직구조를 변하는 과정을 관찰하였다. 이러한 구조 변화에 따른 전기 특성 변화에 대한 연구는 서울대 이관형 교수 연구팀의 분광 분석법과 한국기초과학지원연구원의 정희석 박사 연구팀의 투과전자현미경 관측을 통해 이뤄졌다. 한편, 서울대 정연준 교수 연구팀은 밀도 범함수 이론 (Density Functional Theory, DFT) 계산을 통해 2차원 구조가 나타내는 전기적 특성을 분자 수준에서 규명하였다.
- 또한, 정연웅 교수 연구팀은 저온 합성을 통하여 폴리머인 폴리이미드 (polyimide) 기판 위에 PtSe₂ 2차원 소자를 직접 성장시킴으로써 유연하고 투명한 장비를 제조하는데 성공하였으며, 이 디바이스에 키리가미 (Kirigami) 패턴을 적용하여 180% 까지 신축 가능한 전자장비의 제조에 성공함으로써 유연 전자소자 및 웨어러블 디바이스에 대한 적용 가능성을 제시하였다.
- 본 연구는 세계적인 학술지 ACS Applied Materials & Interfaces에 2019년 3월 11일 출판되었으며, 논문의 우수성과 독창성을 인정받아 속 표지 (supplementary cover image)로 선정되었다.
- 출판 논문 : Horizontal-to-Vertical Transition of 2D Layer Orientation in Low-Temperature Chemical Vapor Deposition-Grown PtSe₂ and Its Influences on Electrical Properties and Device Applications, Sang Sub Han *et. al.* ACS Applied Materials & Interfaces, 2019 DOI: 10.1021/acsami.9b01078 (2019년 3월 11일 온라인 출판)
- 참여 연구진: 한상섭(서울대 및 UCF), 김종훈(연세대), 노찬우(서울대), 김정한(UCF), 지은지(연세대), 권준영(연세대), 유승민(KBSI), 고태준(UCF), 에마뉴엘 오콕부에(UCF), 오규환(서울대), 정희석*(KBSI), 정연준*(서울대), 이관형*(연세대 및 서울대), 정연웅*(UCF) (*: 교신저자)
- 연구비 지원: 미국 센트럴 플로리다 대학교 연구 그랜트(정연웅 교수), 한국연구재단 미래소재디스커버리사업, 이공학개인기초사업(이상 정연준 교수), 중견연구자지원사업, 신재생에너지 핵심기술개발사업, SRC 연구센터(이상 이관형 교수), KBSI 전주센터 운영사업(정희석 박사)



정연웅 교수
(UCF)



정연준 교수
(서울대)



이관형 교수
(서울대)



정희석 박사
(KBSI)

- [붙임] 1. 연구결과 2. 용어설명 3. 그림설명
4. 연구진 이력사항

연구결과

Horizontal-to-Vertical Transition of 2D Layer Orientation in Low-Temperature Chemical Vapor Deposition-Grown PtSe₂ and Its Influences on Electrical Properties and Device Applications

Sang Sub Han, Jong Hun Kim, Chanwoo Noh, Jung Han Kim, Eunji Ji, Junyoung Kwon, Seung Min Yu, Tae-Jun Ko, Emmanuel Okogbue, Kyu Hwan Oh, Hee-Suk Chung*, YounJoon Jung*, Gwan-Hyoung Lee*, and Yeonwoong Jung*

(ACS Applied Materials & Interfaces, DOI: 10.1021/acsami.9b01078)

본 연구에서는 투과전자현미경(Transmission Electron Microscopy, TEM), X선 광전자 분광법(X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS), 라만분광법을 통하여 두께에 따른 2차원 PtSe₂ 소자의 구조분석을 진행하였으며, 전계효과 트랜지스터(Field Effect Transistor) 분석을 통하여 전자기적 특성을 관찰하였다. 이를 통하여 두께에 따라 2차원 PtSe₂ 소자가 수평구조에서 수직구조로(Horizontal to Vertical)의 구조변화가 있는 것을 관찰하고 그에 따라 반도체 성질에서 금속 성질로 전자기적 성질이 변하는 것을 확인하였으며, 반도체 성질을 갖는 두께가 얇은 수평구조의 PtSe₂ 소자가 실온에서 기존의 소자보다 높은 전하 운반자 이동도($\sim 625\text{cm}^2/\text{Vs}$)를 나타냄을 밝혀냈다. 또한 밀도범함수 이론(Density Functional Theory, DFT) 계산을 통하여 각 구조가 나타내는 에너지 띠 구조를 계산하여 각 구조에 따라 나타나는 전자기적 성질의 원리에 대하여 규명하였다. 또한 저온 합성을 통하여 소자를 폴리머 기판위에 직접 성장시켜 고신축성의 유연소자의 개발에 성공하였으며, 소자의 웨어러블 디바이스에의 적용 가능성을 제시하였다.

1. 연구의 필요성

- 전이금속 디칼코게나이드계의 2차원 나노층은 최근 그것들이 가지는 특별한 구조와 박리된 층의 수에 따른 특성으로 인하여 활발한 연구가 이루어지고 있다. 그 중 2차원 PtSe₂ 물질은 높은 전하 운반자 이동도와 높은 안정성, 그리고 금속에서부터 반도체 성질까지의 다양한 전기적 성질로 인하여 최근 다양한 전자 장비의 재료로 활용되고 있으나 재료 특성 및 결정 구조에 관한 연구는 명확하게 이루어지지 않아 소자의 물성 규명에 대한 연구가 필요하다.

2. 연구의 내용

- 연구팀은 저온 합성 방법을 활용하여 대면적 2차원 PtSe₂ 소자 합성에 성공하였다.
- 다양한 두께를 갖는 2차원 PtSe₂ 의 다양한 구조분석을 통하여 소자가 두께에 따라 수평구조에서 수직구조로 변하며 두께가 두꺼워짐에 따라 수직구조가 차지하는 비율이 많아지는 것을 확인하였다.
- 전계효과 트랜지스터 디바이스 측정을 통하여 전자기적 물성을 측정하였으며 수평구조를 갖는 소자는 반도체 성질을, 수직구조를 갖는 소자는 금속 물성을 나타내는 것을 확인하였으며, 수평구조를 갖는 얇은 두께의 2차원 PtSe₂ 소자는 기존 물질보다 높은 이동도(~625cm²/Vs)를 나타내는 것을 확인하였다.
- 밀도 범함수 계산을 이용한 에너지 띠 구조 계산을 통하여 각 구조가 나타낼 수 있는 에너지 띠를 규명하였으며, 이를 통하여 두께에 따른 2차원 PtSe₂ 소자의 전자기적 특성을 밝힐 수 있었다.
- 저온 합성이 가능한 이점을 이용하여 폴리이미드(polyimide) 기판위에 2차원 PtSe₂ 소자를 직접 성장시키는데 성공하였고 키리가미(kirigami) 패턴을 적용하여 2차원 소자의 유연 전자장비 및 웨어러블 디바이스로의 응용 가능성을 제시하였다.

3. 연구의 성과 및 의의

- 기존 연구에서는 2차원 PtSe₂ 소자의 반도체 성질에서 금속 성질로의 전자기적 물성 변화만의 연구가 진행되어 왔으나, 본 연구팀은 투과전자현미경을 통하여 소자의 구조와 전자기적 물성과의 관계를 규명할 수 있었으며, 밀도 범함수 계산을 통하여 이론적으로도 그 관계를 확인할 수 있었다.
- 저온합성의 이점을 이용하여 새로운 기판위로의 성장을 시도할 수 있었고, 폴리머 기판을 선택하여 이전 연구와는 다르게 유연하고 투명한 기판으로의 직접 성장의 성공을 통하여 웨어러블 디바이스 등 다양한 분야로의 2차원 TMD 소자의 응용 가능성을 제시하였다.

용 어 설 명

1. 전이금속 디칼코게나이드계의 2차원 나노물질(2D TMDs)

- 전이금속 디칼코게나이드계 2차원 나노물질은 MX_2 의 화학식으로 나타낸다. 전이금속(주기율표의 d-구역 원소를 통칭, 주기율표 3~12조)인 M과 칼코젠 원소(주기율표 16족)인 X가 서로 공유결합을 이루어 층을 이루며 각 층은 반데르발스 결합을 통하여 결합하고 있다. TMDs 소재들은 구성 원소 및 층의 개수에 따라 금속성, 반도체성, 또는 초전도성 등 다양한 전기적 성질을 나타낸다.

2. 투과전자 현미경 (Transmission Electron Microscopy, TEM)

- 투과전자현미경은 전자현미경의 가장 기본적인 형태로, 얇은 시료에 전자를 통과시켜 확대된 상을 얻는 장치이다. 전자의 물질과는 파장이 가시광선의 파장보다 훨씬 짧아 더 작은 상을 뚜렷하게 볼 수 있다.

3. X선 광전자 분광법 (X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS)

- X선 광전자 분광법은 고진공 중의 시료에 X선을 조사하여, 광전효과에 의해 방출된 각 원소 고유 광전자의 운동 에너지를 분석하는 방법이다. 원소의 가수나 결합상태, 존재 상태 등의 정보를 얻을 수 있으며 분석 대상물은 금속, 반도체, 폴리머 등의 유기물, 세라믹 등 매우 다양하다.

4. 라만 분광법 (Raman Spectroscopy)

- 레이저 광과 같은 강력한 단색의 여기광을 쬐었을 때 분자의 진동수만큼의 차이가 있는 산란광이 생기는 현상인 라만 효과(Raman effect)를 이용하여 분자의 진동수를 구하는 분광법이다.

5. 전계효과 트랜지스터 측정 (Field Effect Transistor 측정)

- 전계효과 트랜지스터(Field effect transistor, FET)는 게이트 전극에 전압을 걸어 채널의 전기장에 의하여 전자 또는 양공이 흐르는 관문(게이트)이 생기게 하는 원리로 소스, 드레인의 전류를 제어하는 트랜지스터이다.

트랜지스터의 분류 상 쌍극 트랜지스터와 대비되어 단극 트랜지스터로 분류된다. FET device에 의해서 측정되는 전자기적 성질을 통하여 소자의 전자기적 물성을 확인할 수 있다.

6. 밀도 범함수 이론 계산 (Density Functional Theory, DFT)

- 밀도 범함수 이론(Density functional theory, DFT)는 양자역학적 계산방법 중의 하나로서 전자 밀도를 이용하여 분자 및 고체계의 전자 구조, 에너지 띠 구조, 물리 및 화학적 성질을 계산할 수 있다.

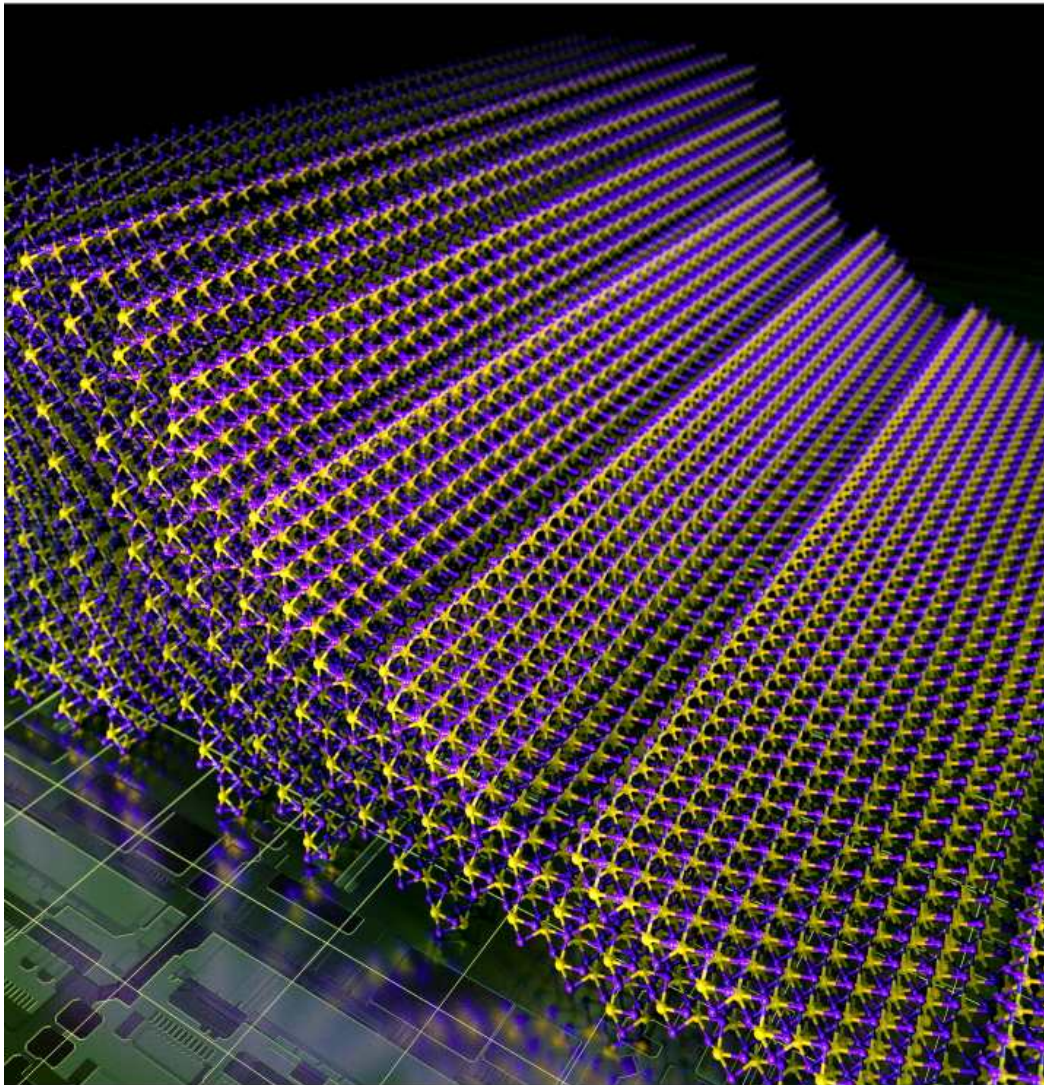
7. 키리가미 (Kirigami)

- 일본어로 자르기(kiri)와 종이(gami)의 합성어로 종이 절단 예술의 이름이다. 종이를 접기보다는 자르는 것을 포함하는 종이접기 변형으로 다양한 패턴의 적용을 통하여 신축성을 부여할 수 있다.

그림 설명

ACS **APPLIED MATERIALS** & INTERFACES

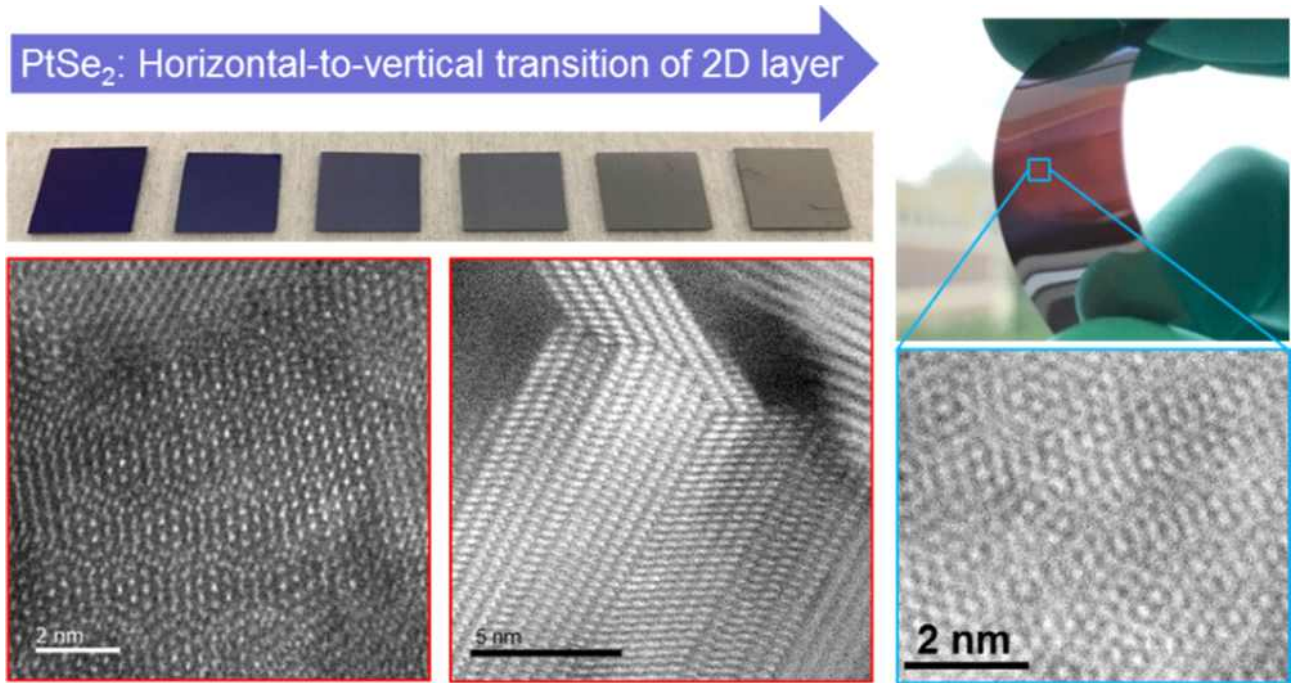
---- 00, 2019
Volume --
Number --
www.acsami.org



 ACS Publications
MOST TRUSTED. MOST CITED. MOST READ.

www.acs.org

ACS Applied Materials & Interfaces 저널(2019년 3월 11일 온라인 출판)의 속표지로 선정된 논문으로서, 2차원 물질이 수평에서 수직 구조로 변화하는 모습을 표현한다.



2차원 PtSe₂ 소자가 두께에 따라 색이 달라지는 모습을 보여준다. TEM (Transmission Electron Microscopy) 분석을 통하여 2차원 층의 두께가 두꺼워짐에 따라 수평 구조에서 수직 구조로 변화함을 알 수 있다. 또한 저온(400°C) 합성을 통하여 유연하고 투명한 폴리이미드 기판에 직접 2차원 PtSe₂를 성장시키는데 성공하였다.

연구자 이력사항

<교신저자>

1. 인적사항

- 성 명 : 정 연 응
- 소 속 : 센트럴 플로리다 대학교
University of Central Florida (UCF)
Material Science and Engineering
- 전 화 : +1-407-823-1033
- E-mail : yeongwoong.jung@ucf.edu



2. 학력

- 1993 - 2000 서울대학교 재료공학부 학사
- 2001 - 2003 일리노이 대학교 (Univ. of Illinois) 재료공학과 석사
- 2003 - 2009 펜실베니아 대학교 (Univ. of Penn) 재료공학과 박사

3. 경력사항

- 2009 - 2015 예일대학교 (Yale University) 박사후 과정
- 2010 - 2012 Los Alamos/Sandia National Lab 방문연구원
- 2015 - 현재 센트럴 플로리다 대학교 조교수

4. 기타 정보

- 센트럴 플로리다 대학교 VPR Advancement of Early Career Researcher 수상
- Marquis “Who’s Who” in the world 초청
- 펜실베니아 대학교 최우수 논문 수상
- 펜실베니아 대학교 NBIC 우수연구자 수상
- MRS 대학원생 우수상 수상

연구자 이력사항

<교신저자>

1. 인적사항

- 성 명 : 정 연 준
- 소 속 : 서울대학교 화학부 교수
- 전 화 : 02-880-4085
- E-mail : yjjung@snu.ac.kr



4. 기타 정보

2. 학력

- 1990 - 1994 서울대학교 화학과 학사
- 1994 - 1997 서울대학교 화학과 석사
- 1997 - 2002 MIT 화학과 물리화학 박사

3. 경력사항

- 2002 - 2005 캘리포니아 버클리 대학교 밀러 펠로우
- 2005 - 2006 노스웨스턴 대학교 박사후 연구원
- 2006 - 현재 서울대학교 화학부 교수
- 2012 캘리포니아 버클리 대학교 방문 교수

4. 기타정보

- 2002 캘리포니아 버클리 대학교 밀러 펠로우쉽 수상
- 2010 서울대학교 자연과학대학 교육부문 우수교수 선정
- 2011 왕립화학회 Faraday Meeting 연사 초청
- 2012 Faraday Discussions Most-read article 선정
- 2016 삼성미래기술육성사업 미래기술연구과제 선정
- 2019 대한화학회 신국조 학술상 수상 (2019년 4월 19일)

연구자 이력사항

<교신저자>

1. 인적사항

- 성 명 : 이 관 형
- 소 속 : 서울대학교 재료공학부
- 전 화 : 02-880-8366
- E-mail : gwanlee@snu.ac.kr



2. 학력

- 1995 - 2000 서울대학교 재료공학부 학사
- 2000 - 2006 서울대학교 박사

3. 경력사항

- 2002.08 - 2003.07 미국 일리노이 대학교 방문연구원
- 2006.09 - 2010.02 삼성전자 LCD & OLED사업부 책임연구원
- 2010.03 - 2014.02 미국 컬럼비아 대학교 박사후연구원
- 2014.03 - 2017.08 연세대학교 신소재공학과 조교수
- 2017.08 - 2019.02 연세대학교 신소재공학과 부교수
- 2019.03 - 현재 서울대학교 재료공학부 부교수

4. 기타 정보

- 2018년 한국세라믹학회 젊은세라미스트 수상
- 2018년 삼성전기 논문대상 특별상

연구자 이력사항

<교신저자>

1. 인적사항

- 성 명 : 정 희 석
- 소 속 : 한국기초과학지원연구원 전주센터 책임연구원
- 전 화 : 063-711-4528
- E-mail : hschung13@kbsi.re.kr



2. 학력

- 1996 - 2003 홍익대학교 학사 (신소재공학과, 서울)
- 2003 - 2010 서울대학교 박사 (재료공학부, 석/박사 통합과정)

3. 경력사항

- 2006 - 2007 펜실베니아 대학교 (Univ. of Penn) 재료공학부 방문 연구원
- 2010 - 2011 펜실베니아 대학교 (Univ. of Penn) 재료공학부 박사후 연구원
- 2011 - 2013 삼성전기 중앙연구소 책임연구원
- 2013 - 2017 한국기초과학지원연구원 선임연구원
- 2018 - 현재 한국기초과학지원연구원 책임연구원

4. 기타 정보

- 2006 - 2007 한국연구재단 공학단 학문후속세대 선정
- 2009 서울대학교 재료공학부 우수대학원생
- 2018 - 현재 한국현미경학회 학술이사

연구자 이력사항

<공동연구>

1. 인적사항

- 성 명 : 오 규 환
- 소 속 : 서울대학교 재료공학부
- 전 화 : 02-880-8306
- E-mail : kyuhwan@snu.ac.kr



2. 학력

- 1980 서울대학교 금속공학과 학사
- 1983 서울대학교 금속공학과 석사
- 1986 서울대학교 금속공학과 박사

3. 경력사항

- 1990 - 1991 옥스퍼드 대학 (Univ. of Oxford) 박사후 연구원
- 1984 - 1993 한국과학기술연구원 (KIST) 연구원
- 1993 - 현재 서울대학교 재료공학부 교수

연구자 이력사항

< 제 1 저자 >

1. 인적사항

- 성 명 : 한 상 섭
- 소 속 : 서울대학교 재료공학부 재료가공공정연구실
센트럴 플로리다 대학교 재료공학부
- 전 화 : 02-880-8306
- E-mail : hary77@snu.ac.kr / sangsub.han@ucf.edu



2. 학력

- 2005 - 2012 한양대학교 재료공학부 학사
- 2013 - 서울대학교 재료공학부 석·박사 통합과정

3. 경력사항

- 2018 - 현재 센트럴 플로리다 대학교 방문연구원