

산학연 연구실 소개 (1)

KAIST FUNNANO 연구실

(KAIST Functional Nanotechnology Laboratory)

주소: (우: 34141) 대전광역시 유성구 대학로 291 한국과학기술원 응용공학동 W1-1 1404호

전화: 042-350-3328 (사무실), 042-350-3368 (연구실)

E-mail: ysjung@kaist.ac.kr, 홈페이지: http://funnano.kaist.ac.kr



연구책임자 | 정연식 교수
KAIST 신소재공학과

1. Functional Nanotechnology Laboratory(FUNNANO Lab.) 소개

본 연구실에서는 초미세 자기조립(self-assembly) 현상, 나노전사프린팅 공정, 그리고 용액/진공 기반의 합성 기술을 기반으로 기능성이 뛰어나면서도 잘 제어된 나노구조체를 대량으로 배열하거나 제조하는 핵심 원리 및 공정 기술을 개발하고 이를 다양한 응용 분야에 적용하는 연구를 수행하고 있다. 특히 자기조립을 이용한 미세 패턴 형성 기술은 현재 분해능(resolution) 한계에 직면한 광 기반 리소그래피 공정을 보완할 차세대 리소그래피 기술로 대두되고 있으며, FUNNANO 연구실에서는 Sub-10 nm급 초미세 패턴 형성 및 관련 공정 개선을 통해 실제 산업 적용을 위한 다각적인 연구를 중점적으로 수행하고 있다. 아울러, 자기조립 기술을 차세대 비휘발성 메모리 제조 공정에 접목하여 소자의 소비 전력을 낮추고 신뢰성을 향상시키는 등 성능 향상을 꾀하는 연구도 더불어 진행하고 있다. 또한 차세대 나노 제조 기술의 하나로써 기존 방법과 비교하여 분해능과 전사 효율이 크게 향상된 20 nm 이하급 초미세 나노전사프린팅 기술을 개발하고 있으며, 이에 기반한 고성능 소재/소자 혁신에 활용하고 있다. 또한, 용액 상에서 대량으로 합성한 양자점을 이용한 차세대 태양전지 개발 연구도 진행하고 있다.

2. 주요 연구 분야 소개

2.1 Sub-10 nm 리소그래피

블록 공중합체(block copolymer)의 스스로 조립하려는 성질을 이용한 DSA(directed self-assembly) 기술은 20 nm 이하의 미세 패턴을 형성할 수 있는 실용적인 해상도 향상 기술의 하나로써 각광받고 있다. 본 연구실에서는 높은 χ 를 갖는 블록 공중합체로서 polystyrene-*b*-polydimethylsiloxane (PS-*b*-PDMS)를 도입하여 8-20 nm 범위의 선폭을 갖는 패턴을 얻을 수 있었다. 하지만 χ 가 증가함에 따라 자기조립을 위한 시간

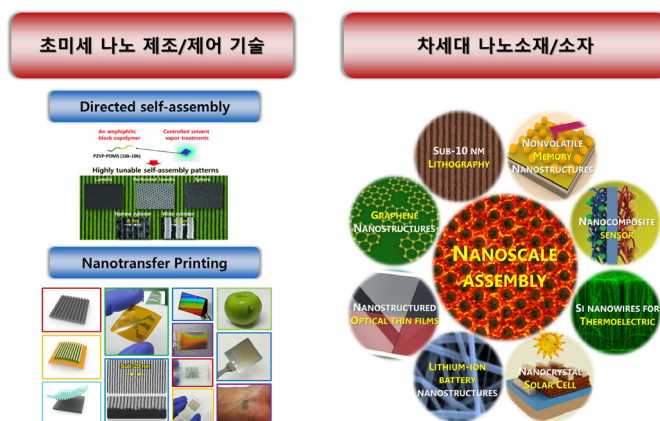


그림 1. FUNNANO 연구실 중점 연구 분야 소개.

이 길어지는 단점을 해결하기 위해서 본연구실에서는 가열식 용매 어닐링(warm solvent annealing) 방법을 개발하여 고분자와 용매의 온도를 독립적으로 조절할 수 있는 새로운 챔버를 제작하였으며 PS-*b*-PDMS 블록 공중합체를 이용해 15 nm 초미세 패턴의 품질을 대폭 개선 하면서도 공정시간 또한 수 분 단위로 단축할 수 있음을 *Advanced Functional Materials*지에 보고하였다. 또한 최근에는 추가적인 어닐링 공정 없이 스핀 코팅 만으로도 10 nm 이하 선폭을 갖는 초미세 패턴을 가이드 기판 안에 정렬할 수 있는 원리와 결과를 *Advanced Materials*지에 발표하였다. 이를 활용하면 DSA 패턴 구현의 편의성 측면에서 큰 장점을 가질 수 있게 된다.

2.2 초미세 나노전사 프린팅 기술

나노전사 프린팅(nanotransfer printing) 기술은 표면에 나노 패턴이 형성된 탄성 물질을 이용하여 나노 구조체를 증착 등의 방식으로 형성하고, 이를 표면 접촉을 통해 다양한 기판 상으로 전사시키는 기술이다. 나노전사 프린팅 기술은 복잡한 리소그래피 공정 없이 간단하게 나노 제도가 가능하며, 유연 기판 등 미래형 기판 소재에도 구조체 전사가 가능하다는 장점으로 나노 소자와 유연 전자 소자를 포함한 다양한 미래 소자 제작에 폭넓게 활용될 수 있는 높은 기술 잠재성을 보유하고 있다. 하지만, 많은 장점에도 불구하고 50 nm

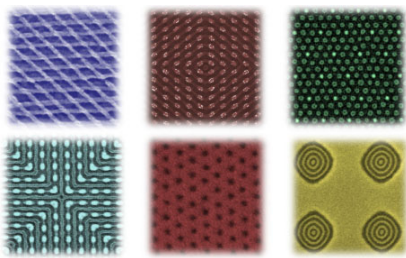


그림 2. 높은 χ 를 갖는 PS-*b*-PDMS 블록공중합체로 구현된 DSA 패턴의 예.

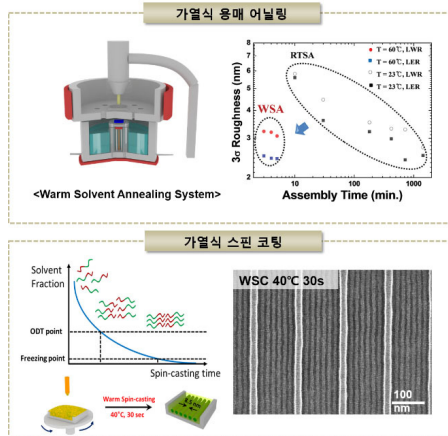


그림 3. 가열식 용매 어닐링(위)과 가열식 스핀 코팅(아래)에 의한 DSA 공정 개념 및 구현 결과.

이하 수준의 초미세 분해능이 확보되지 못했고, 균일한 패턴 복제 문제와 제조된 나노 구조체의 원활한 전사 문제가 해결되지 못해 고밀도 나노소자 제작 등에 있어서는 한계가 있어 왔다.

본 연구실은 기존 나노전사 프린팅 기술이 가지는 기술적 한계점들을 극복하기 위한 체계적인 기술적 전략들을 제시해 오고 있다. 특히 최근 *Nature Communication*지에 보고한 연구에서는 분해능의 획기적인 향상을 위하여, 자기조립 기술을 접목하여 기존 기술로는 확보가 어려운 최소 8 nm 선폭을 가지는 초미세 템플릿을 제작하는데 성공하였다.

또한, 기존 기술의 또 다른 한계점인 낮은 전사 효율 문제를 해결하기 위해, 유기 용매 증기를 이용한 접착력 제어 원리를 도입하였다. 유기 용매를 함유함으로써 유기 용매 증기를 쉽게 제공해 줄 수 있는 PDMS 젤(gel) 패드를 전사 매개체로 사용하였다. 이를 활용하여 복제된 초미세 나노구조체들을 전처리 없이 원하는 표면 상에 전사 가능하였다. 이러한 새로운 나노전사 프린팅 기술은 산화물, 금속, 고분자 등 다양한 조성의 기판 표면뿐만 아니라 유연 기판 등 다양한 기판상에 나노 구조체 형성이 가능하였으며 3차원 적층 구조 형성 또한 가능함을 보고하였다. 자기 조립과 나노전사 프린팅 기술을 결합한 새로운 나노제조 기술은 높은 양산성과 저비용, 고해상도, 넓은 응용성 등의 장점으로 고해상도 나노 제조 기술에 폭넓게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2.3 고민감도 SERS 기판

표면증강 라만 산란 효과(surface-enhanced raman scattering effect, SERS)는 라만 분광 기술이 갖고 있는 낮은 감지 한계 문제를 가장 효과적으로 해결 할 수 있는 기술 중 하나이며 라만 분광 기술 특유의 장점인 다양한 물질 분석의 용이성, 비파괴성, 비침습적인 특성과 결합하여 다양한 미량 시료의 분석이나 생체/의료 진단 등의 다양한 분석에 응용될 수 있는 기술이다.

본 연구팀은 최근 *Chemistry of Materials*지에 발표한 논문

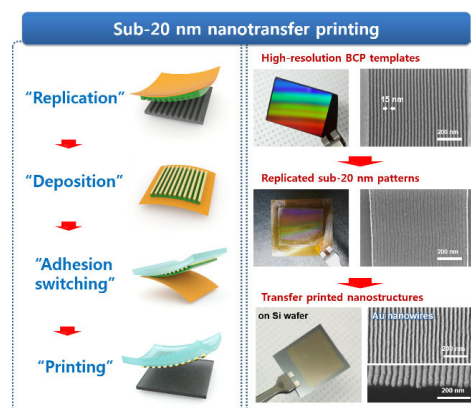


그림 4. 초미세 나노전사 프린팅 기술의 분해능 및 전사 수율 향상에 관한 연구.

에서 블록 공중합체의 자기조립 구조물을 이용하여 10 nm 수준의 초미세 패턴을 효과적으로 형성함을 보고하였다. 특히 SERS 효과의 극대화 및 신호세기의 균일성을 확보하기 위해 동심원형태의 나노구조체를 디자인하고 구현하였다. 아래 그림 5a에 나타난 것과 같이 자기조립기술의 응용을 통해 고밀도의 동심원 나노구조체를 형성하였으며 다양한 미량 물질의 탐지 및 높은 신호 균일도를 확인하였다. 특히 동심원 구조체의 특징을 이용하여 일반적인 분자의 검출뿐만 아니라 다양한 비대칭적인 구조를 갖는 분자 또한 효과적으로 검출할 수 있는 구조를 제시했다는 점에서 의의가 있다.

뿐만 아니라 앞서 설명한 초미세 나노전사프린팅 기술의 접목을 통해 전자 가능한 형태의 SERS 기판으로의 응용 또한 가능하다. 한 가지 대표적인 예로써 과일 표면에 존재하는 잔류 농약의 검출을 들 수 있다. 그림 5b와 같이 과일 표면에 고밀도 SERS 기판을 전사하고 라만 분광을 통해 분석을 진행하면 SERS 기판이 있는 부분에서만 특이적으로 잔류하는 농약의 특성 피크(peak)가 확연히 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 자기조립기술과 초미세 나노전사프린팅 기술의 접목을 통해 새로운 형태의 SERS 기판을 제시하는 것이며 이를 통해 다양한 분야의 진단/탐지 기술에 폭넓게 이용될 것으로 예상된다.

2.4 차세대 비휘발성 메모리

반도체 메모리는 크게 휘발성 메모리와 비휘발성 메모리로 나눌 수 있는데, DRAM의 빠른 동작 속도와 NAND flash memory의 비휘발성 장점을 동시에 갖는 차세대 비휘발성 메모리에 대한 요구가 점점 증가하게 되었고, 그 중 PRAM(phase change RAM), ReRAM(resistive RAM), MRAM(magnetic RAM) 등이 가장 유망한 차세대 비휘발성 메모리로 각광을 받고 있다. 본 연구실에서는 블록공중합체 자기조립 기술을 적용하여 PRAM과 ReRAM 소자의 성능을 대폭 개선하는 연구가 활발히 진행되어 왔다.

PRAM의 경우 동작속도가 빠르며 비휘발성이라는 장점을 가지고 있지만 높은 전력 소비량의 문제 등이 남아 있다. 따라서 본 연구실에서 전극과 상변화 물질 사이에 블록 공중합체 자기조립을 통해 형성된 절연 특성의 SiO_x 나노 구조체를 삽입함으로써 전극과 상변화 물질과의 접촉 면적을 감

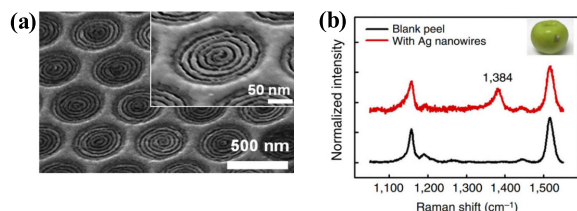


그림 5. (a) 자기조립을 통해 형성된 초미세 동심원 나노구조체. (b) SERS를 이용한 잔류 농약 검출 결과.

소시켜 최종적으로 전력소비가 20배 가량 감소된 초저전력 PRAM 메모리 소자를 구현하였다(2013년, *ACS Nano*지 보고).

비휘발성 메모리의 또다른 형태인 ReRAM(저항 메모리) 소자는 적당한 전기적 신호를 가하면 저항이 큰 상태에서 절연성 박막층에 전도성 필라멘트가 형성되어 저항이 낮아지는 상태로 바뀌는 메모리 특성을 보인다. 이러한 ReRAM은 동작속도가 매우 빠르고 낮은 전압에서 작동하며 구조가 간단한 장점을 갖지만, 작동 전압과 저항의 산포가 좋지 않아 신뢰성의 문제를 갖고 있다. 본 연구실에서는 이에 상부 전극과 산화물층 사이에 블록 공중합체 자기조립을 통한 절연 특성의 SiO_x 나노구조체를 삽입함으로써 필라멘트가 형성되는 영역을 제어해 셋(set), 리셋(reset) 전압의 산포를 각각 76.9%, 59.4%씩 감소시켜 ReRAM 메모리 소자의 신뢰성을 크게 향상시키는 연구 결과를 2014년과 2015년 *ACS Nano*지에 보고하였다.

2.5 콜로이드 양자점 태양전지

콜로이드 양자점 기반의 태양전지는 저온에서 용액 공정을 통해 생산이 가능할 뿐만 아니라, 양자점의 크기를 조절함에 따라 소자의 밴드갭을 광범위하게 제어할 수 있기 때문에 차세대 태양전지로서 많은 각광을 받고 있다. 본 연구실에서는 양자점 태양전지의 특성을 이해하고 이를 통해 소자의 효율을 향상시키는 연구를 진행하고 있다.

쇼트키 접합 구조의 태양전지는 투명전극/반도체/금속 전

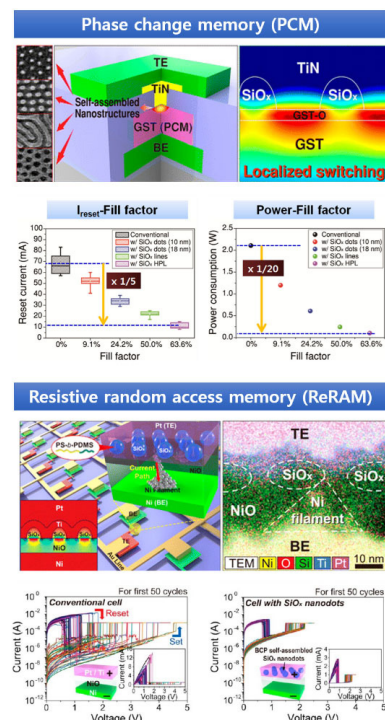


그림 6. 상변화 메모리의 소비 전력 감소 및 저항 메모리의 신뢰성 향상에 관한 연구.

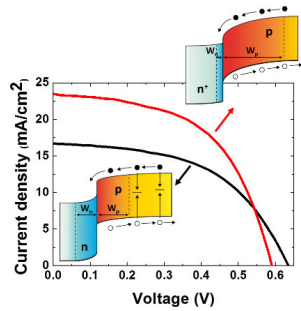


그림 7. p-n⁺ 헤테로 접합을 사용한 고효율 양자점 태양전지의 에너지 밴드 구조 및 분석 결과(2015년 *Advanced Materials*).

극만으로 구성되기 때문에 매우 간단한 구조로서, 제조 공정이 수월하다는 장점이 있다. 하지만 쇼트키 접합 구조로 만든 양자점 태양전지의 경우, 양자점/금속 계면의 결함들이 페르미 준위를 고정시킴으로써 낮은 효율의 원인이 되었다. 본 연구실에서는 2014년 *Energy and Environmental Science*지에 발표한 논문에서 쇼트키 접합에 생기는 페르미 준위 고정 현상을 효과적으로 억제할 수 있는 방법을 보고하였다. 얇은 산화막을 활용하여 양자점 박막이 금속과 직접적으로 접촉했을 때 생기기 쉬운 계면 결함들을 효과적으로 억제하여, 결과적으로 약 6.7배의 효율 향상을 기록하였다.

최근에는 소자의 효율을 더 높이기 위해 쇼트키 접합 구조 대신 p-n 헤테로 접합 구조의 양자점 태양전지가 많이 개발되고 있다. 본 연구실에서는 boron-doped ZnO를 사용하여, 새로운 p-n⁺ 헤테로 접합을 적용함으로써 효율을 37% 향상시켰으며, 최고 7.55%의 효율을 달성하였다. 이를 통하여 ITO 등의 별도의 투명전극이 필요 없는 형태의 새로운 양자점 태양전지의 구현에도 성공하였다.

2.6 본 연구실의 비전 및 전망

본 연구실의 핵심 연구 분야인 초미세 자기 조립 기술과 나노전사 프린팅 기술은 2차원, 3차원으로 완벽하게 정렬된 초미세 나노 소재를 대면적으로 구현할 수 있다. 이를 바탕으로 구조와 기능성이 정밀하게 제어된 새로운 나노소재를 실현하는 한편, 고성능 센싱 소자, 투명전극, 디스플레이용 부품 등을 넘어서 에너지 저장 전극, 촉매 등 다양한 분야에 응용 가능할 것으로 기대된다.

3. 참고 논문 (연구실 대표 논문)

1. T. Yim, M.-S. Park, S.-G. Woo, H.-K. Kwon, J.-K. Yoo, Y. S. Jung, K. J. Kim, J.-S. Yu, and Y.-J. Kim, *Nano Lett.*, Online (2015).
2. J. H. Lee, Y. J. Kim, J.-Y. Cho, S. R. Yang, J. M. Kim, S. Yim, H. Lee, and Y. S. Jung, *Adv. Mater.*, Online (2015).
3. B. H. Mun, B. K. You, S. R. Yang, H. G. Yoo, J. M. Kim, W. I. Park, Y. Yin, M. Byun, Y. S. Jung, and K. J. Lee, *ACS Nano*, **9**, 4120 (2015).
4. J. M. Kim, Y. J. Kim, W.-I. Park, Y. H. Hur, J. W. Jeong, D. M. Sim, K.-M.



〈연구실 구성원〉

5. Baek, J. H. Lee, M.-J. Kim, and Y. S. Jung, *Adv. Fun. Mater.*, **25**, 306 (2015).
5. C. K. Jeong, K. M. Baek, S. Niu, T. W. Nam, Y. H. Hur, D. Y. Park, G.-T. Hwang, M. Byun, Z. L. Wang, Y. S. Jung, and K. J. Lee, *Nano Lett.*, **14**, 7031 (2014).
6. J. W. Jeong, S. R. Yang, Y. H. Hur, S. W. Kim, K. M. Baek, S. Yim, H.-I. Jang, J. H. Park, S. Y. Lee, C.-O. Park, Y. S. Jung, *Nat. Commun.*, **5**, 5387 (2014).
7. W. I. Park, J. M. Kim, J. W. Jeong, and Y. S. Jung, *ACS Nano*, **8**, 10009 (2014).
8. B. K. You, W. I. Park, J. M. Kim, K.-I. Park, H. K. Seo, J. Y. Lee, Y. S. Jung, and K. J. Lee, *ACS Nano*, **9**, 9492 (2014).
9. J. G. Lee, Y. S. Jung, S.-H. Han, K.-M. Kim, and Y.-K. Han, *Adv. Mater.*, **26**, 2894 (2014).
10. M.-J. Choi, J. Oh, J.-K. Yoo, J. Choi, D. M. Sim, and Y. S. Jung, *Energy Environ. Sci.*, **7**, 3052 (2014).
11. J.-K. Yoo, J. Kim, M.-J. Choi, Y.-U. Park, J. Hong, K. M. Baek, K. Kang, and Y. S. Jung, *Adv. Energy Mater.*, **4**, 1400622 (2014).
12. C. A. Ross, K. K. Berggren, J. Y. Cheng, Y. S. Jung, and J.-B. Chang, *Adv. Mater.*, **26**, 25, 4386 (2014).
13. W. I. Park, Y. J. Kim, J. W. Jeong, K. Kim, J.-K. Yoo, Y. H. Hur, J. M. Kim, E. L. Thomas, A. Alexander-Katz, and Y. S. Jung, *Sci. Reports*, **3**, 3190 (2013).
14. J. W. Jeong, Y. H. Hur, H. Kim, J. M. Kim, W. I. Park, M. J. Kim, B. J. Kim, and Y. S. Jung, *ACS Nano*, **7**, 8, 6747 (2013).
15. W. I. Park, B. K. You, B. H. Mun, H. K. Seo, J. Y. Lee, S. Hosaka, Y. Yin, C. A. Ross, K. J. Lee, and Y. S. Jung, *ACS Nano*, **7**, 2651 (2013).
16. J. K. Yoo, J. Kim, Y. S. Jung, and K. Kang, *Adv. Mater.*, **24**, 5452 (2012).
17. J. Lee, K. Kim, W. I. Park, B.-H. Kim, J. H. Park, T.-H. Kim, S. Bong, C.-H. Kim, G. S. Chae, M. Jun, Y. Hwang, Y. S. Jung, and S. Jeon, *Nano Lett.*, **12**, 6078 (2012).
18. J. W. Jeong, W. I. Park, M. D. Lee, J.-H. Park, T.-H. Kim, G. Chae, and Y. S. Jung, *Adv. Mater.*, **24**, 3526 (2012).
19. W. I. Park, J. M. Yoon, M. Park, J. Lee, S. K. Kim, J. W. Jeong, K. Kim, H. Y. Jeong, S. Jeon, K. S. No, J. Y. Lee, and Y. S. Jung, *Nano Lett.*, **12**, 1235 (2012).
20. J. W. Jeong, W. I. Park, M.-J. Kim, C. A. Ross, and Y. S. Jung, *Nano Lett.*, **11**, 4095 (2011).
21. Y. S. Jung, J. H. Lee, J. Y. Lee, and C. A. Ross, *Nano Lett.*, **10**, 3722 (2010).
22. X. Liang, T. Chen, Y. S. Jung, Y. Miyamoto, G. Han, S. Cabrini, B. Ma, and D. L. Olynick, *ACS Nano*, **4**, 2627 (2010).
23. X. Liang, Y. S. Jung, S. Wu, A. Ismach, D. L. Olynick, S. Cabrini, and J. Bokor, *Nano Lett.*, **10**, 2454 (2010).
24. Y. S. Jung, J. B. Chang, E. Verploegen, K. K. Berggren, and C. A. Ross, *Nano Lett.*, **10**, 1000 (2010).
25. J. K. W. Yang, Y. S. Jung, J. B. Chang, R. A. Mickiewicz, A. A. Katz, C. A. Ross, and K. K. Berggren, *Nat. Nanotech.*, **5**, 256 (2010).