

나노분말을 이용한 패터닝 기술

양상선, 이해문, 김용진 | 재료연구소

1. 서 론

전기/전자 소자를 비롯한 다양한 소자 기술에 있어서 소형화와 고성능화를 달성하기 위해서는 수십 nm 이하의 패터닝 구현이 필수불가결하지만 현재의 기술인 광리소그래피 및 CVD를 포함한 기존의 반도체공정을 사용하여서는 달성될 수 없는 상황이다. 에어로졸 공정 및 나노크기 분말을 이용한 패터닝 기술은 이러한 한계를 극복하고 나노소자의 제조를 위한 나노 패터닝의 구현에 있어 필수적이라고 할 수 있다. 많은 연구자들이 기존의 공정을 개선하거나 전혀 새로운 나노분말 패터닝 기술에 관한 다양한 연구를 수행하고 있다. 폴리머 stamp를 사용하여 기판에 전하를 전달하여 만들어진 패터닝과 하전된 나노분말을 사용하여 패터닝을 구현하는 Nanoxerography 연구를 비롯하여 기존의 광리소그래피 공정을 이용하고 나노분말의 집속효과를 이용하여 패터닝을 구현하는 나노분말 집속패터닝 연구, AFM tip을 이용하여 기판에 직접 패터닝을 만드는 Dip-Pen Nanolithography 등의 연구를 수행하고 있으

표 1. 나노분말을 이용한 패터닝 구현 연구 동향

번호	패터닝 기술	연구그룹	참고문헌
1	Nanoxerography	Whitesides(미) Jacobs(미) Fissan(독) Choi(한)	Science, 291, 1763, 2001 Adv. Mater., 14, 1553, 2002 Part.Part.Syst.Character., 19, 321, 2002 Microelectro. Engin., 71, 229, 2004
2	Patterned deposition	Fissan(독)	Mater. Sci. Tech., 18, 717, 2002
3	Focused patterning	Fissan(독) Choi(한)	Part.Part.Syst.Character., 19, 321, 2002 Nature Nanotech., 1, 117, 2006
4	Electrostatic-directed deposition	Zachariah(미)	Nanotech., 16, 1856, 2005
5	Electrostatic funneling	Koh(미)	Nano Lett., 7, 439, 2007
6	Aerodynamic lens	Girshick(미)	Appl. Phys. Lett., 77, 910, 2000
7	Magnetic focusing	Biringer(독)	Europhys. Lett., 60, 573, 2002
8	Dip-Pen Nanolithography	Mirkin(미) Hong(한)	Science, 288, 1808, 2000 Science, 283, 661, 1999

며 표 1에 나타난 바와 같이 패턴을 구현함에 있어서 다양한 전자기적 특성을 이용하여 새롭거나 기존의 공정을 개선하려는 연구가 진행되고 있다.

2. 본론

2.1 Nanoxerography를 이용한 나노분말 패터닝

미국 Harvard대학의 Whitesides 교수와 미네소타 대학의 Jacobs 교수, 독일 Gerhard-Mercator 대학의 Fissan 교수, 서울대 최만수 교수 등의 연구자들은 폴리머(PDMS) stamp와 하전된 나노분말을 이용한 패터닝 연구를 수행하고 있다. Stamp는 유연함을 갖기 위해 폴리머로 제작 되고 원하는 패턴을 리소그래피 공정을 통하여 제작하게 된다. 그 뒤 전도성을 띠기위하여 금속으로 코팅을 하게 되는데 주로 Au/Cr의 이중 코팅층이 사용된다. 이러한 PDMS stamp의 금속층을 원하는 패턴을 만들고자 하는 Si 기판 위에 접촉(stamping)시킨 다음 전압을 가해 전하를 PMMA로 전달시킨다. 그러면, Si기판 위에는 원하는 모양의 전기적패턴이 형성되게 되는데 이 전기적 패턴 위로 용융/증발을 포함한 여러가지 방법을 통하여 제작된 반대 극성으로 하전된 나노분말을 흘려 보내주면 전기적 인력에 의해 원하는 나노분말의 패턴이 만들어진다. 그림 1에 stamp와 하전된 나노분말을 이용한 패터닝 기법의 모식도와 나노분말의 패턴 사진이 나타나 있다. 나노분말의 하전을 위해서는 방사선 원소를 함유한 Neutralizer 또는 UV charger 등이 주로 사용된다. 이 방법은 대면적 기판에 대한 균일한 접촉이 곤란할뿐 아니라 PDMS pattern resolution의 한계 때문에 해상도는 수 μm 정도이며 입자 패턴 기판이 비전도성 물질이어야 한다는 제약이 있고, 폴리머 stamp와 금속전도층의 결합문제와 전기적 상호작용에 대한 명확한 이론적 정립이 필요하다고 판단된다. 하지만, stamping 작업을 통하여 패터닝 공정이 간단하고 고속작업이 가능하다는 뛰어난 장점이 있어 위 문제를 해결한다면 나노분말의 패터닝에 지대한 공헌을 할 수 있을 것으로 판단된다.

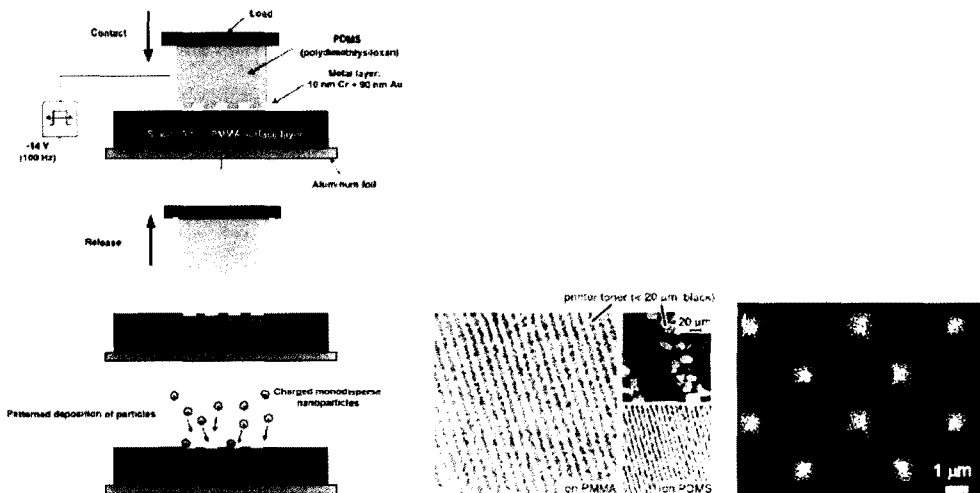


그림 1. Nanoxerography법을 이용한 나노분말 패터닝의 모식도 및 이 기법을 이용한 마이크로 크기의 나노분말 패턴사진 (Choi 그룹, Whitesides 그룹)

2.2 Patterned deposition을 이용한 나노분말 패터닝

나노분말의 패턴에 관한 연구에 있어서 기존의 상용화된 공정을 이용하거나 그 공정을 좀 더 발전시키는 연구가 산업에 적용할 수 있는 가장 쉬운 방법일 것이다. 독일 Gerhard-Mercator 대학의 Fissan 교수는 기존의 광 리소그래피 공정과 CVD공정을 응용한 나노분말 패터닝법을 개발하였으며, 정전기적 집속을 통하여 기존의 리소공정을 이용하여 제조한 PR패턴보다 작은 패턴을 만드는 연구도 수행하였다. 이를 자세히 설명하자면, 그림 2에 나타난 바와 같이 GaAs surface위에 기존의 광리소그래피 공정을 통하여 원하는 PR패턴을 구현하고 이 기판위에 기판과 반대의 극성으로 하전된 나노입자를 흘려보낸다. 하전된 나노분말은 정전기적 인력에 의해서 기판의 pre패턴에 부착되게 되는데 이때 PR패턴에 축적된 전하와 기판에 인가된 전압은 일정한 전기장을 형성하게 되고 이에 따라 나노분말의 집속효과를 나타내게 된다. 마지막으로 PR패턴을 제거하게 되면 원하는 나노분말 패턴을 얻을 수 있으며 기존 리소공정으로 얻어진 Pre패턴보다 작으면서 마이크로미터 이하 크기의 패턴까지 가능하게 된다. 이 패턴위에 2차 PR을 만들고 반복하면 멀티레이어 패턴의 제작이 가능하다. 이 기법은 PR제거 후에 나노분말 노이즈가 존재할 수 있으나, 기존의 리소공정을 이용할 수 있으면서 보다 더 집속된 작은 패턴을 얻을 수 있다는데 있어서 우수성을 인정받고 있다.

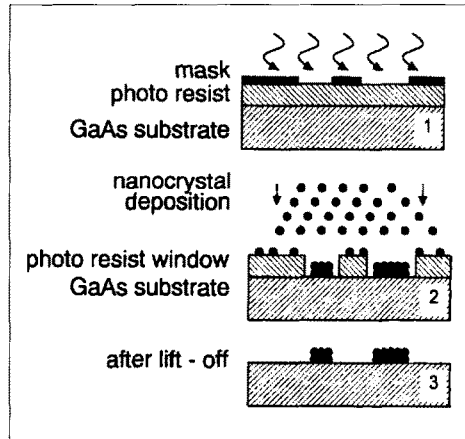


그림 2. 광리소그래피를 이용한 나노분말 패턴 (Fissan 그룹)

2.3 Electrodynamic focusing을 이용한 나노분말 패터닝

독일 Fissan 교수의 연구를 보다 발전시킨 기존의 광 리소그래피 공정을 기반으로 하고 이온 주입과 정전기적 집속을 이용한 에어로졸 공정기반의 나노분말 미세패턴 제조 연구가 서울대 최만수 교수 그룹에서 행하여지고 있다. 기상법을 이용하여 나노입자를 생성시키고 neutralizer를 통하여 하전된 뒤 Nano-Differential Mobility Analyzer (Nano-DMA)로 분류시켜 하전된 단분산 에어로졸 나노입자를 공급하고 이 하전된 나노분말의 흐름에 코로나 charger를 이용해 이온을 주입하여 이온이 부착된 하전된 나노분말을 만들게 된다. 이 나노분말은 전기장이 걸려있는 photoresist(PR)로 패터된 기판(예를 들면 p-type Si wafer)위에 보내지게 되는데 이때 걸려있는 전기장과 하전된 에어로졸 입자의 정전기적 상호작용으로 PR 패턴내로 입자가 들어가 부착되고 PR을 제거하면 원래 PR 패턴 보다 작은 나노입자 패턴을 넓은 표면에서 구현하게 된다(그림 3, 4). 이때 주입된 이온과 PR에 축적

된 동일 전하에 의해 보다 더 큰 집속 효과가 나타나게 된다. 이 나노입자 패터닝 기술은 에어로졸 기반 기술로서 넓은 표면에 빠른 속도로 높은 정확도를 가지고 나노에서 마이크로까지 다양한 모양의 나노입자 어레이를 형성시킬 수 있는 매우 실용적인 parallel patterning 기술이며, 기판 표면이 금속이거나 비금속에 관계없이 다양한 나노입자를 패터닝할 수 있고 이온주입과 집속효과를 통해 기존 lithography의 한계를 극복할 수 있는 장점이 있다.

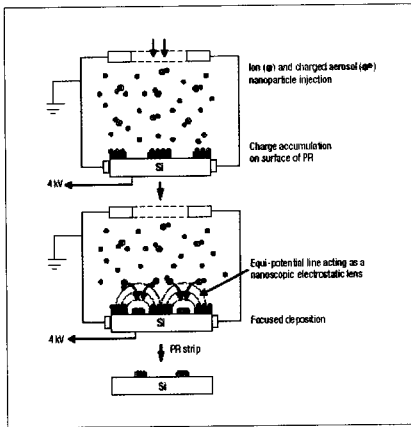


그림 3. 이온주입으로 인한 나노입자 집속효과 의 모식도(Choi 그룹)그림

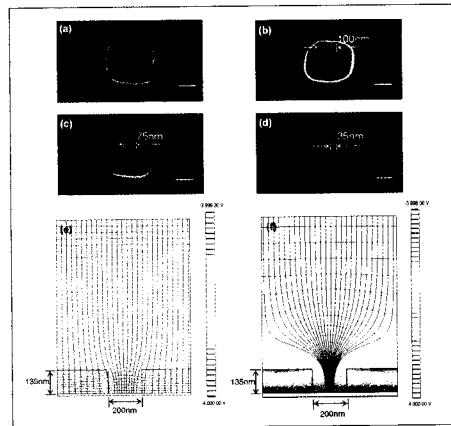


그림 4. 이온주입으로 인한 나노입자 집속효과의 수치해 석결과와 실제 나노분말 부착 사진(Choi 그룹)

2.4 Electrostatic-directed deposition(biased P-N)을 이용한 나노분말 패터닝

메릴랜드 대학의 자카리아 교수 그룹에서는 biased p-n junction과 하전된 나노분말을 사용하여 나노분말 패턴을 제조하는 연구를 수행하고 있다. 광리소그래피 공정을 통하여 GaAs n-type 기판위에 마이크로미터 크기의 p-type line를 제조하여 p-n junction을 제조한 뒤 이 p-n junction에 DC 전압을 인가하고 하전된 Ni 나노분말을

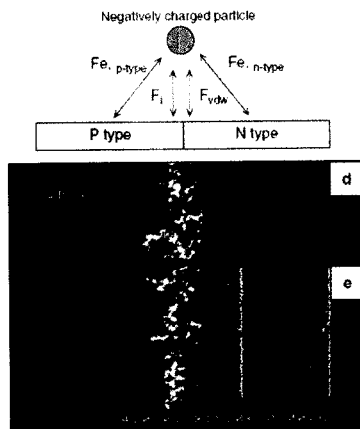


그림 5. DC전압이 인가된 p-n junction과 하전된 나노분말간의 외부 힘의 평형에 관한 모식도와 양전위로 하전된 나노분말이 p-type 구역에 부착된 사진(Zachariah 그룹)

에어로졸 공정을 이용하여 공급하였다. 음전위로 하전된 경우에는 n-type 구역에 나노분말이 부착 되었으며, 양전위로 하전된 나노분말을 사용할 경우에는 p-type 구역에 부착되었다. 그림 5에는 DC전압이 인가된 p-n junction과 하전된 나노분말간의 외부 힘의 평형에 관한 모식도가 나타나 있으며, 양전위로 하전된 나노분말이 p-type 구역에 부착된 사진을 나타내었다. 이 기법은 기판에 다소 많은 나노분말의 노이즈가 있으나 비교적 쉽게 대면적에 패턴을 구현할 수 있다는 장점이 있다.

2.5 Electrostatic funneling을 이용한 나노분말 패터닝

정전기적 funneling 효과를 이용한 나노분말의 정밀 패터닝에 관한 연구가 텍사스 대학의 Koh 교수 그룹에 의해 행하여지고 있다. 그림 6에 정전기적 funneling 효과에 대한 모식도가 나타나 있고 이를 이용하여 제조될 수 있는 나노분말의 정밀 패턴 모형과 실제 패턴 사진이 나타나 있다. 기판은 양극과 음극을 띄게 교차로 하전되어 있으며 이 기판에 하전된 나노분말 콜로이드를 담지시켜 기판과 나노분말이 전기적 이중층과 상호작용을 일으키게 된다. 음전위로 하전된 나노입자가 기판의 양전위로 하전된 선과 반응할 때 그림 6의 x 방향으로 상호작용 에너지의 구배가 양전위로 하전된 선의 중심으로 향하게 하는 가로방향의 힘을 발생시키게 된다. 이러한 원리에 의해 나노분말은 중심에 위치하게 된다. 이 기법은 규칙적인 나노분말의 정밀 패턴이 제조 가능하지만 패턴간의 간격이 100 nm 정도 이상을 나타내는 단점이 있다.

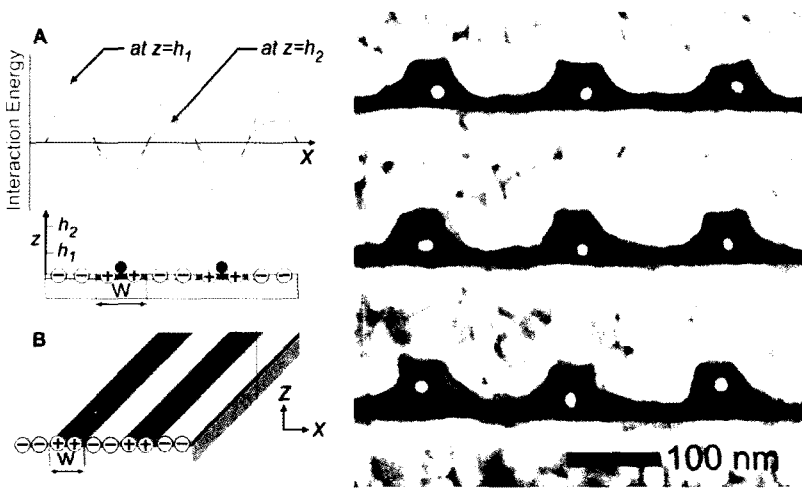


그림 6. 정전기적 funneling 효과의 모식도와 이를 이용한 나노분말의 정밀 패턴 모형과 실제 패턴 사진(Koh 그룹)

2.6 Aerodynamic lens를 이용한 나노분말 패터닝

미네소타 대학의 Girshick 교수 그룹은 플라즈마와 aerodynamic lens를 이용한 나노분말 타워 및 패턴을 제조하는 연구를 수행하였다. 플라즈마를 사용하여 나노분말을 제조하고 이 분말을 확장 챔버 내로 흘려보내고 이 확장 챔버와 5단으로 구성된 Aerodynamic lens를 거치게 된다(그림 7). 이렇게 보내는 나노분말은 3mm의 최종노즐을 통하여 약 300m/s 정도의 속도로 스테인리스 스틸과 알루미늄 등 여러 금속 기판에 부착 시켰다. SiC 나노분말의 이 기법을 사용하여 약 50 μ m의 선폭을 갖는 지그재그 패턴을 얻을 수 있었다. 이 기법은 빠른 시간에 패턴의

형성이 가능하지만 대면적 형성과 균일 및 미세 패턴의 구현이 어려우며 나노분말의 노이즈도 피할 수 없을 것으로 판단된다.

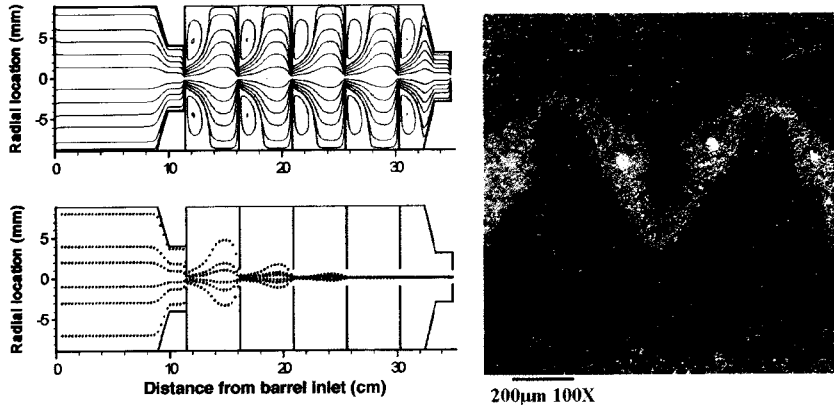


그림 7. Aerodynamic lens 챔버내에서 계산된 유선과 실제 나노분말의 궤적, 실제 구현된 50 μm의 SiC 지그재그 패턴 사진(Girshick 그룹)

2.7 Magnetic focusing을 이용한 나노분말 패터닝

자성 나노분말과 자기장을 이용한 나노분말 패터닝에 관한 연구가 독일의 Birringer 교수 그룹에 의하여 행하여 졌다. 이 기법은 그림 8에 나타난 바와 같이 철 전구체를 에어로졸 공정과 전기로를 통하여 철 나노분말을 제조하고 자기장이 형성된 구역 내에 기판을 위치하여 자성 나노분말 패턴을 제조하였다(그림 9). 이 방법은 패턴 구성 물질이 자성 나노분말로 제한되면 대면적 패턴 제작이 어려우며 노이즈가 많다는 단점이 있지만 비교적 간단한 공 정으로 패턴의 제조가 가능하다는 장점이 있다.

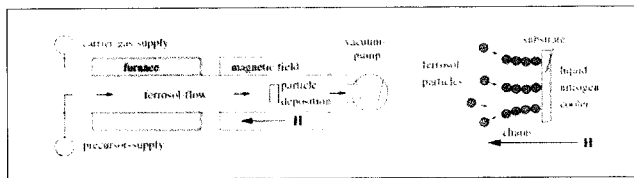


그림 8. 에어로졸 유동과 자기장을 이용한 나노분말 부착 모식도(Birringer 그룹)

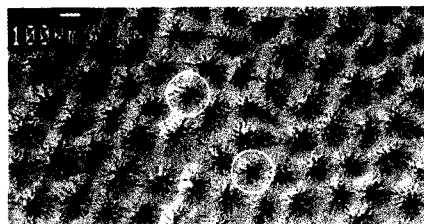


그림 9. Fe 나노분말과 자기장을 이용한 나노 꽃 패턴 사진(Birringer 그룹)

2.8 Dip-Pen Nanolithography(DPN)를 이용한 나노분말 패터닝

미국 Northwestern 대학의 Mirkin 그룹에서는 Dip-Pen Nanolithography라는 기술을 이용하여 분자 등을 기판에 패터닝하는 하는 연구를 수행하고 있다. 이 기법은 고체의 금속기판에 atomic force microscope (AFM) tip 을 사용하여 직접 원하는 패턴을 구현하는 방법이다. DPN을 이용하여 패턴을 구현하는 모식도가 그림 10에 나타나 있다. 그림 10에 나타나 있듯이 AFM tip으로부터 원하는 분자의 모세관현상에 의하여 금 기판으로 이동하여 tip이 진행된 방향에 원하는 패턴이 구현되는 현상이다. 현재 수 나노미터 굵기의 선폭을 구현할 수 있는 우수한 수준까지 와 있으나, 대면적의 패턴 구현에 제약이 있다는 단점이 있다.

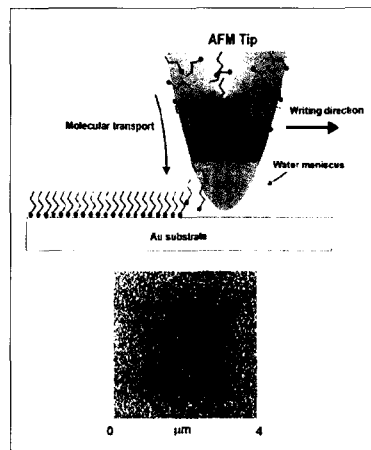


그림 10. DPN을 이용하여 패턴을 구현하는 모식도와 이 기법으로 제조된 grid 패턴(Mirkin 그룹)

3. 결 론

나노분말을 이용한 패터닝 연구에 있어서 세계적인 연구 추세는 패턴 내의 노이즈 감소, 나노크기 미세패턴 구현 및 대면적 패턴을 고속 구현할 수 있는 기법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본론에서 언급했듯이 여러 가지 새로운 기법들이 시도되고 있으나, 패터닝 기술의 상용화를 위해 기존의 광리소그래피 및 반도체 공정을 응용하거나 이용할 수 있는 진보된 패터닝 기법을 개발하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 이러한 나노분말을 이용한 나노패턴은 기존 소자의 한계를 극복하고 전기/전자/기계분야의 나노 소자의 고성능화 및 경박단소화에 비약적인 발전을 가져 올 것이며, 소자의 효율증대 및 에너지 소비저감을 이룩할 수 있을 것이다. 또한, 바이오소자의 구현을 통하여 생명과학의 진보를 이끌어 낼 수 있을 것으로 판단된다. 여러 과학기술 분야가 서방 선진국에서 기술적 주도권을 가지고 있듯이 나노분말 패터닝 분야도 미국, 독일 등 선진연구자들이 다양한 기초과학 기술을 바탕으로 주도하고 있으나, 나노분말 집속패터닝 및 나노임프린트 기술을 비롯한 몇몇 분야에서는 우리나라 과학자들 역시 세계 최고수준의 기술을 구현하고 있다. 우리나라는 반도체 관련 저변 기술과 기반연구시설이 세계 최고 수준으로써 이를 이용하고 학제간 및 산/학/연 간의 공동연구를 바탕으로하고 정부의 지속적인 관심과 지원이 이루어진다면 나노분말 패터닝 분야의 세계 기술을 선도할 수 있을 것으로 판단된다.

* 참고 문헌

- [1] H.O. Jacobs, G.M. Whitesides “Submicrometer patterning of charge in thin-film electrets” *Science* 291 (2001) 1763.
- [2] H.O. Jacobs, S.A. Campbell, M.G. Steward “Approaching nanoxerography: the use of electrostatic forces to position nanoparticles with 100 nm scale resolution” *Adv. Mater.* 14 (2002) 1553.
- [3] T.J. Krinke, K. Deppert, M.H. Magnusson, H. Fissan “Nanostructured deposition of nanoparticles from the gas phase” *Part. Part. Syst. Char.* 19 (2002) 321.
- [4] M. Kang, H. Kim, B. Han, J. Suh, J. Park and M. Choi “Nanoparticle pattern deposition from gas phase onto charged flat surface” *Microelectro. Engin.* 71 (2004) 229.
- [5] F. Otten, U. Auer, F.E. Kruijs, W. Probst, F.J. Tegude, and H. Fissan “Lithographic tools for producing patterned films composed of gas phase generated nanocrystals” *Mater. Sci. Technol.* 18(7) (2002) 717.
- [6] H. Kim, J. Kim, H. Yang, J. Suh, T. Kim, B. Han, D. S. Kim, S. Kim, Peter V. Pikhitsa and M. Choi “Parallel patterning of nanoparticles via electrodynamic focusing of charged aerosols” *Nature Nanotech.* 1 (2006) 117.
- [7] L.C. Ma, R. Subramanian, H.W. Huang, V. Ray, C.U. Kim, and S.J. Koh “Electrostatic Funneling for Precise Nanoparticle Placement: A Route to Wafer-Scale Integration” *Nano Letters* 7 (2007) 439.
- [8] D-H Tsai, S. H. Kim, T. D. Corrigan, R. J. Phaneuf, and M. R. Zachariah “Electrostatic-Directed Deposition of Nanoparticles to a Field Generating Substrate” *Nanotechnology* 16 (2005) 1856.
- [9] F. Di Fonzo, A. Gidwani, M. H. Fan, D. Neumann, D. I. Jordanoglou, J. V. R. Heberlein, P. H. McMurry, S. L. Girshick, N. Tymiak, W. W. Gerberich, and N. P. Rao, *Appl.Phys.Lett.* 77 (2000) 910.
- [10] H. Wolf, H. M. Sauer and R. Birringer “Magnetic-field-induced spontaneous pattern formation in aerosol-particle deposits” *Europhys. Lett.* 60 (2002) 573.
- [11] S. Hong, C. A. Mirkin “A Nanoplotter with Both Parallel and Serial Writing Capabilities” *Science* 288 (2000) 1808.
- [12] R. Piner, J. Zhu, F. Xu, S. Hong, C. A. Mirkin “Dip-Pen Nanolithography” *Science* 283 (1999) 661.



양 상 선

· 재료연구소 분말기술연구그룹 선임연구원
· 관심분야 : 나노입자 합성 및 응용기술
· E-mail : nanoyang@kims.re.kr



이 혜 문

· 재료연구소 나노기능분말연구그룹 선임연구원
· 관심분야 : 에어로졸 공정을 이용한 나노분말 합성 및 응용기술
· E-mail : hyelee@kims.re.kr



김 용 진

· 재료연구소 분말기술연구그룹 책임연구원
· 관심분야 : 습식공정을 이용한 나노금속분말 제조 및 응용기술
· E-mail : yjkim@kims.re.kr