

나노 임프린트 기술을 이용한 나노 구조 광학 소자 제작

본고에서는 나노 임프린트 기술의 광학소자 응용에 관한 “물리학과 첨단기술” 10월호 (2004) (저자: 이기동·안세원)님의 글을 소개하고자 한다.

-반도체 제조 기술의 발전은 다른 기술 분야에까지 영향을 주게 되었는데, 특히 차세대 통신 기술로 주목받고 있는 광통신의 등장으로 이의 구현에 필요한 반도체 광원 및 광신호처리 소자의 제작에 반도체 제조 기술이 응용되게 되었다. 하지만, 대부분의 광 소자는 사용되는 빛의 파장과 버금가거나 그 이상의 크기를 가지고 있기 때문에 반도체 소자의 제작에 사용되는 정도의 고 분해능 리소그래피 기술이 필요하지 않다고 생각되어 왔다. 그러나 최근 활발히 연구되고 있는 광결정(photonic crystal) 소자, 광학 링 레조네이터(optical ring resonator) 소자, 파장 이하 주기(subwavelength) 광학 소자 등 나노스케일의 구조를 갖는 광학 소자의 등장으로 최신 반도체 기술과 버금가거나, 그 이상의 정밀도를 가지는 노광 기술의 필요성을 인식하게 되었다. 현재 위에 언급된 초미세 광소자 의 제작에는 전자빔 리소그래피 방법이 주로 사용되고 있다.

전자빔 리소그래피 방법을 이용하면 최소 10 nm의 선폭의 구현도 가능하지만, 낮은 생산성으로 인해 연구 개발 결과가 산업화로 연결되지 못하는 실정이다. 따라서, 파장 이하 주기 광학 소자와 같은 소위 나노 구조 광학 소자(nano-structured optical device)를 정밀하게 경제적으로 신뢰성을 갖고 생산할 수 있는 기술의 개발이 요구되고 있다. 이러한 나노 구조 광학 소자의 대량 생산에 적합한 기술 중 하나가 바로 나노 임프린트 기술이다. 본고는 나노 임프린트 기술에 대한 간단한 소개와 함께 나노 광학 소자 제작에의 응용을 다룬다.

한국기계연구원 최대근 (Choi, Dae-Geun)

나노임프린트 기술의 개요

나노 임프린트 리소그래피(NIL: Nano-Imprint Lithography) 는 1990년대 중반 미국 프린스턴 대학의 Stephen Y. Chou 교수에 의해 도입된 나노 소자 제작 방법으로서, 생산성이 낮은 전자빔 리소그래피나 고가의 광학 리소그래피를 대신할 기술로 주목받고 있다. 나노 임프린트(nano-imprint) 기술은 콤팩트 디스크(CD)와 같이 마이크로(micro) 스케일의 패턴을 갖는 고분자 소재 제품의 대량 생산에 사용되는 엠보싱(embossing)기술을 리소그래피에 적용한 것이다. 나노 임프린트 기술의 핵심은 전자빔 리소그래피 등의 고급 리소그래피 기술을 이용 하여 나노 스케일의 구조를 갖는 스탬프를 제작하고, 그 스탬프를 고분자 박막에 각인하여 나노 스케일의 구조를 전사하며, 제작된 스탬프를 반복하여 사용함으로써 전자빔 리소그래피가 갖는 낮은 생산성 문제를 극복하는 것이다. 나노 임프린트 기술은 2003년 초 미국 MIT의 Technology Review가 선정한 세계를 바꿀 10가지 신생 기술에 포함되었고, 2003년 국제 반도체 기술 지도(International Technology Roadmap for Semiconductor)에 32 nm 이하의 반도체 소자 제작에 사용될 차세대 리소그래피 기술로 포함되었다.

그림 1은 대표적인 두 가지 타입의 나노 임프린트 공정 흐름을 보여준다. 그림 1(a)는 프린스턴 대학의 Chou 교수가 제안한 방법으로서, 나노 스케일의 패턴이 형성된 단단한 몰드(hard mold)를 이용하여 적절한 온도와 압력에서 기판 위에 코팅된 고분자 박막을 성형한 후, O₂ 플라즈마를 이용한 식각공정을 통해 최종 패턴을 제작하게 된다. 이와 같은 방법을 이용하여 10 nm 이하의 패턴도 제작할 수 있다는 연구 결과가 발표된 바 있다.[1]

한편, 그림 1(b)에서는 텍사스 주립 대학의 Wilson 교수에 의해 제안된 S-FIL(Step and Flash Imprint Lithography) 방법을 나타내었다.[2] S-FIL 공정에서는 우선 기판 위에 고분자 전이층(organic transfer layer)을 코팅한다. 다음으로 나노 스케일의 패턴이 제작된 투명한 템플릿(template)을 점도가 낮은 자외선 경화 용액이 뿌려진 기판에 근접시키면, 모세관 현상에 의해, 기판과 템플릿 사이의 나노 패턴에 의해 형성된 공간에 용액이 채워지게 되고 이때

한국기계연구원 최대근 (Choi, Dae-Geun)

자외선을 위에서 조사하게 되면 경화가 되어 결국 템플릿의 패턴이 고분자 박막으로 전사된다. 전사된 고분자 박막은 다량의 실리콘 성분이 함유되어 일반 고분자 박막에 비해 매우 높은 식각 선택비를 가진다. 전사된 고분자 패턴은 식각 공정을 통해 아래의 전이층으로 전사된다. S-FIL 공정은 높은 온도와 압력을 필요로 하지 않고, 또한, 작은 면적의 템플릿을 가지고도 스텝-반복(step-and-repeat) 방식으로 전체 웨이퍼 위에 나노 스케일의 패턴을 채울 수 있는 장점이 있기 때문에 현재 많은 연구가 진행되고 있다.[4,5].

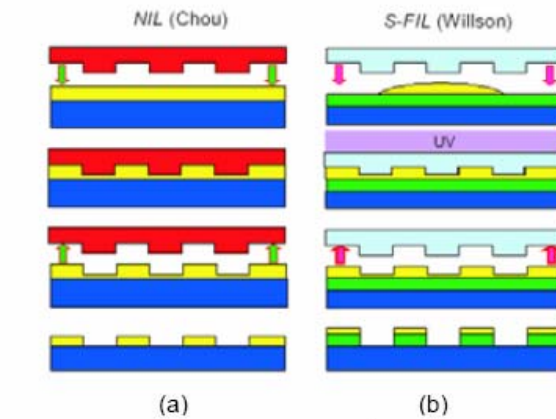


그림 1. (a) 나노 임프린트 공정 (b) S-FIL 공정.^[4]

나노 임프린트 기술에서 가장 도전적인 과제 중의 하나는 바로 나노 스케일의 패턴이 새겨진 몰드의 제작 기술이다. 10nm 이하의 패턴을 제작하기 위해서는 일반적으로 단단한 몰드(hard mold)가 사용되며 이러한 정밀도가 요구되지 않을 경우는 기존의 마이크로 콘택트 프린팅에서와 같이 부드러운 몰드(soft mold)를 사용할 수도 있다. 현재 Si, SiO₂, SiC, SiN, 사파이어 등의 물질이 단단한 몰드의 재료로서 많이 사용되고 있다. 일반적으로 나노임프린트 공정은 고온, 고압에서 이루어지기 때문에 열팽창에 의한 패턴의 변형을 최소화하기 위하여 기판과 열적 특성이 유사한 재질을 사용하는 것이 바람직하다. 응용처에 따라 달라질 수 있지만, 대부분의 경우 Si 또는 SiO₂를 이용하여 몰드를 제작하게 된다. S-FIL과 같이 자외선 경화 고분자를 사용하는 경우는 자외선 투과도 및 경도를 고려하여 퀴츠 글래스(quartz

한국기계연구원 최대근 (Choi, Dae-Geun)

glass)를 주로 사용한다. 나노 임프린트 기술의 최근 연구 동향과 응용 분야에 대해 자세히 소개한 최근 논문으로는 미국 미시간 대학의 Guo 교수 논문이 있다.[5]

나노 임프린트 기술을 이용한 나노 구조 광학소자 제작

최근 연구되고 있는 많은 나노 구조 광학 소자들은 대부분 전자빔 리소그래피를 이용하여 패턴을 제작하고 있다. 그러한 소자의 특성은 패턴 선폰 및 구조의 변화에 민감한 경우가 많기 때문에 정밀한 패턴 형성이 매우 중요하다. 이는 전자빔 리소그래피의 생산성을 떨어뜨리는 또 하나의 요인이 된다.

이와 같이 중요한 초미세 패턴 형성이 필요한 광 소자의 제작에 나노 임프린트 기술을 적용할 수 있다.

1. 광학 링 레조네이터

광학 링 레조네이터(optical ring resonator)는 집적광학 회로의 구현을 위한 중요한 구성 단위(building block)로서 제안되어 현재 많은 연구가 이루어지고 있는 소자이다.[6] 광학 링 레조네이터는 그림 2와 같이 직선 도파로와 그와 인접한 링(ring) 모양의 도파로로 이루어져 있으며 링 도파로가 공명 조건(resonance condition) - 광파가 링 도파로를 한바퀴 돌 때의 위상 변화가 2π 의 정수배가 되는 조건 - 을 만족하지 못할 때는 두 도파로 간의 결합 현상이 일어나지 않으므로 직선 도파로에 입사된 광파는 그대로 직선 도파로의 출력단으로 전달되며, 링 도파로가 공명 조건을 만족할 때에는 직선 도파로에 입사된 광파가 링 도파로로 전달되므로 직선 도파로의 출력단에서의 광파위는 줄어들게 된다. 이와 같은 이유로 특정 파장에서만 광파위가 링도파로로 전달되는 필터 특성을 보이게 되는데, 광학 링 레조네이터는 대역폭이 좁고 Q 값(quality factor)이 매우 큰 특징을 가지고 있다. 이러한 특징을 이용하여 광학 링 레조네이터는 미래의 광통신 시스템에서 파장 애드/드롭 필터 (add/drop filter), 스위치(transition), 변조기(modulator), 레이저, 그리고 분산 보상기(dispersion compensator) 등으로 사용될

수있다.

위에서 설명한 바와 같이 광학 링 레조네이터는 Q 값이 큰 민감한 소자이기 때문에 링 도파로의 구조, 그리고 두 도파로간의 간격에 따라 소자의 특성이 크게 변하게 된다. 특히 두도파로의 간격은 일반적으로 100 nm에서 수백 nm 사이의 값을 가지며 매우 정밀하게 제어되어야 한다.

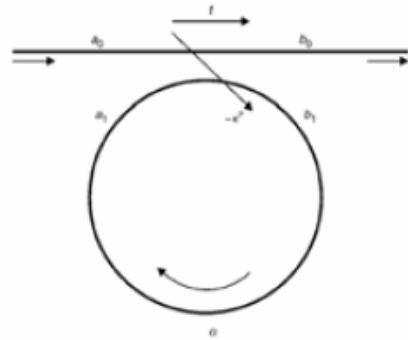
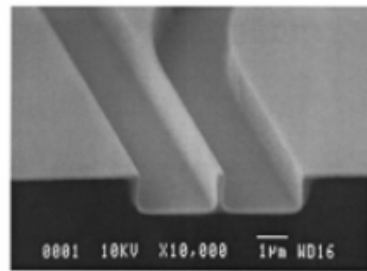


그림 2. 광학 링 레조네이터의 구조.



(a)

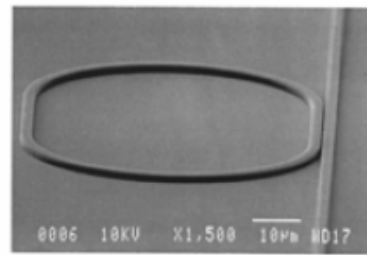


그림 3. (a) SiO₂ 몰드 (b) 임프린트 패턴.

미시간 주립 대학의 Guo 교수 그룹에서는 고분자 광학 링레조네이터를 나노임프린트 기술을 이용하여 제작하는 연구를 수행하였다.[7] 일반적인 나노임프린트 기술과 약간 다른 점은 식각용 마스크로서 고분자 패턴을 제작하는 것이 아니라 몰드를 이용하여 직접 고분자 광도파로 패턴을 제작한다는 점이다. 그림 3에 Guo 교수 그룹에서 광학 링 레조네이터의 제작을 위해 제작한 몰드와 이를 이용하여 임프린트한 패턴의 사진을 나타내었다. 그림 3(a)에는 몰드의 사진이 나와 있는데, 직선 도파로와 링 도파로의 결합 영역 근방을 촬영한 것이다.

채널의 깊이는 1.5 μm ~ 2.0 μm 정도이고, 두 채널간의 간격은 100 nm ~ 200 nm 정도이다.

한국기계연구원 최대근 (Choi, Dae-Geun)

따라서 몰드에서 두 채널 사이의 패턴은 10:1 이상의 높은 종횡비(aspect ratio)를 갖게 된다. 그림 3(b)에는 임프린트 공정을 이용하여 제작된 고분자 패턴이 나와 있다. Guo 그룹에서는 PMMA(poly methyl-metacrylate) 또는 폴리스티렌(polystyrene) 등의 고분자 재료를 도파로 재료로서 사용하였는데, 그림 3(b)에는 PMMA에 대한 임프린트 패턴을 나타내었다. 임프린트 조건은 같은 고분자 재료를 사용하여도 전사하고자 하는 구조의 크기, 모양, 밀도에 따라 달라질 수 있으며, 특히 임프린트 후에 몰드를 고분자 박막으로부터 분리해 내는 디몰딩(demolding) 공정시 임프린트 패턴이 변형될 수도 있기 때문에 조건 선정시 주의가 요망된다.

2. 광결정(Photonics crystal) 소자

광 결정 소자는 굴절률이 다른 두 유전체를 공간상에 주기적으로 배치할 때 생기는 광 밴드 갭(Photonic Band Gap)을 이용하는 소자이다. 광 밴드 갭에 해당하는 에너지를 갖는 빛은 광 결정 내에 존재하지 못하며, 이를 이용하여 도파로, 공진기, 필터 등을 제작할 수 있다. 특히, 광 결정 도파로는 전반사원리를 따르는 기존의 도파로와 달리 굽힌 도파로 부분에서 손실이 발생하지 않아, 다 기능이 집적된 광학 소자를 연결할 수 있는 기술로 주목되고 있다. 이 밖에 2차원 광 결정을 발광다이오드나 유기 발광 디스플레이에 적용하여 발광 효율을 높일 수 있다는 연구 결과도 보고되고 있다. 광 결정에 대해서는 물리학과 첨단기술 2004년 5월호에 자세히 소개된바 있다. 1차원 및 2차원 광 결정 제작은 전자 빔 리소그래피나 레이저 간섭 리소그래피를 이용한 반도체 공정을 통해 이루어지고 있다. 그 외에 콜로이드 자기조립법을 이용한 광결정을 제조하는 방법들이 시도되고 있다. 그러나 이 기술은 아직은 광 결정 소자의 대량 생산에는 적합하지 않거나 다양한 형태의 광 결정 제작에 한계를 갖고 있다. 국내 연구진으로는 카이스트 물리학과 (광 및 레이저 이용) (<http://pbg.kaist.ac.kr>), 생명화학공학과 (자기조립 입자 이용) (<http://msfl.kaist.ac.kr>) 등의 교수팀들이 활발히 연구중이다.

나노 임프린트 기술은 저가의 나노 패터닝 기술을 제공하여 광 결정 소자의 대량 생산에

적용될 수 있다. 그러나, 광 결정소자는 아직 기초 연구에 머물고 있고, 나노 임프린트 기술을 이용한 광 결정 제작의 연구도 몇 건이 보고되고 있으나,[8] 아직은 초기 단계라고 할 수 있다. 그러나, 광결정 소자 제작 기술이 보다 성숙해지면 소자의 상용화를 위해 나노 임프린트 기술이 이 분야에 더욱 중요하게 적용될 것이라 예상된다.

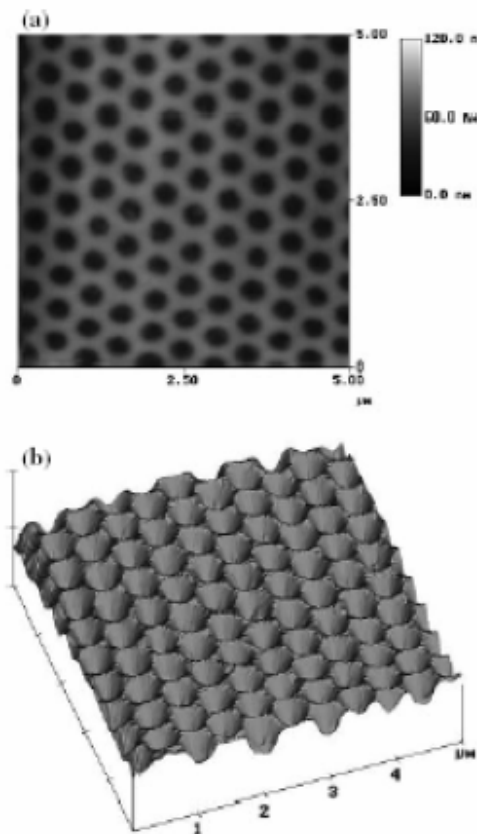


그림 4. 나노 임프린트 공정으로 제작된 광 결정.^[8]

3. 파장 이하 주기(Subwavelength) 광학 소자

일반적으로 회절 격자는 빛의 파장보다 큰 주기를 가진다. 그러나, 격자의 주기가 빛의 파장의 반 이하가 되면, 구조 복굴절(form birefringence)이라는 흥미로운 현상이 생긴다. 이러한 구조의 특징은 회절파가 발생하지 않고, 0차 광에 해당하는 투과광과 반사광만 존재하며,

한국기계연구원 최대근 (Choi, Dae-Geun)

편광에 따라 변화하는 굴절률을 갖는다는 것이다. 즉, 광학적으로 등방성인 물질에 파장 이하 크기의 주기를 줌으로써 인공적인 복굴절 물질을 만들 수 있다. 이러한 구조 복굴절을 이용하여 선 격자 편광자(wiregrid polarizer)와 파장판(waveplate)과 같은 편광 제어 광학 소자를 제작할 수 있다.[9] 이러한 구조 복굴절 소자의 장점은 반도체 공정을 이용하므로 대량 생산에 적합하며, 다양한 기능의 광학 소자의 집적화에 유리한 것이다. 또한, 상용화된 고분자 소재의 편광자와 파장판에 비해 열적으로 안정하다. 가시광선 대역에서 작동하는 이들 소자는 나노 스케일의 패터닝 및 높은 종횡비(aspect ratio) 식각 기술이 요구되어 제작이 어렵다.[10] 특히, 선 격자 편광자의 경우, 가시광선 대역에서 사용되기 위해서는 200 nm 이하의 주기, 100 nm 이하의 선폭의 구조를 요구한다. 편광자의 광학 특성은 편광 소멸비(extinction ratio)로 표현되는데, 주기가 짧을수록 높은 편광 소멸비를 갖게 된다. 따라서, 우수한 성능의 편광 소멸비를 갖기 위해서는 100 nm 이하의 선폭의 패터닝 기술이 요구된다. 현재 상용화된 선 격자 편광자는 선폭 70nm, 주기 140 nm의 미국 Moxtek사의 제품으로 편광 소멸비는 450 nm 파장에서 약 800이다. 선 격자 편광자는 금속 선 격자가 투명한 기판 위에 배열된 구조로, 빛의 편광이 격자에 평행할 경우에는 반사되지만, 격자에 수직할 경우 투과되는 소자이다. 즉, 격자에 평행한 편광은 금속 격자를 금속으로 보지만, 수직한 편광은 나노 스케일의 선폭을 금속으로 보지 않고 투과한다. 최근, LG전자기술원에서는 50 nm 선폭, 100 nm 주기의 선 격자 편광자를 나노 임프린트 리소그래피 방법으로 제작하였다.

파장 이하의 주기를 갖는 미세 구조는 복굴절 뿐 아니라, 반사 방지(anti-reflection) 효과를 갖는다. 일반적으로 굴절률이 다른 계면에서는 프레넬(Fresnel) 반사가 일어나며, 공기/유리 계면에서는 수직 입사시 4% 정도의 빛을 잃게 된다. 통상적으로 사용되는 반사 방지막은 두 계면에서 반사하는 빛의 상쇄간섭을 이용하며, 가시 광선 전 영역에 걸쳐 효과를 갖기 위해서는 다층막이 사용된다. 미세 구조에 의한 반사 방지는 표면으로부터 매질 내로 굴절률이 점차적으로 변하는 것을 이용하여 프레넬 반사를 줄이는 것이다. 또한 그 주기가 파장의 반

한국기계연구원 최대근 (Choi, Dae-Geun)

이하이므로 회절 현상을 보이지 않는다. 그림 5는 실리콘 표면에 형성된 260 nm 주기의 2차원 격자를 이용한 반사방지 구조이다.[11] 나노 임프린트 기술은 이러한 반사 방지 구조의 생산에도 사용될 수 있다.

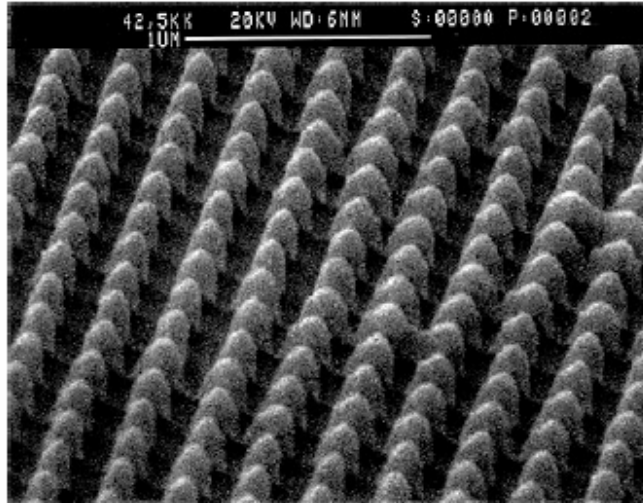


그림 5. 260 nm 주기의 2차원 반사 방지 구조

맺음말

나노 임프린트 기술은 현재 실험실 수준의 연구에서 상용화 초기 단계로 접어들고 있다. 나노 임프린트 기술이 현재의 반도체 기억/정보 처리 소자의 생산에 적용되기에는 많은 시간이 걸릴 것으로 보인다. 그러나 본고에서 논의된 나노 패터닝 기술을 요구하는 광학 소자의 제작에 나노 임프린트 기술이 적용된다면, 가까운 시일에 기술의 상용화가 가능하다. 나노구조의 광학 소자는 마이크로 디스플레이, 차세대 광 저장 장치 및 광 통신 소자에 폭넓게 활용될 것이다. 이들 소자의 상용화를 통해 나노 임프린트 기술은 한 단계 더 발전하여 궁극적으로 주류 나노 리소그래피 기술의 하나가 될 것이라 전망된다.

참 고 문 헌

한국기계연구원 최대근 (Choi, Dae-Geun)

- [1] S. Chou, P. R. Krauss, and P. J. Renstrom, *Appl. Phys. Lett.* **67**, 3114 (1995).
- [2] M. Colburn *et al.*, *Proc. SPIE* **3676**, 379 (1999).
- [3] P. Ruchhoeft *et al.*, *J. Vac. Sci. Technol. B* **17**, 2965 (1999).
- [4] D. J. Resnick *et al.*, *J. Vac. Sci. Technol. B* **21**, 2624 (2003).
- [5] L. J. Guo, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **37**, R123 (2004).
- [6] B. E. Little and S. T. Chu, *Opt. Photonics News* **11**, 24 (2000).
- [7] C. Y. Chao and L. J. Guo, *J. Vac. Sci. Technol. B* **20**, 2862 (2002).
- [8] D. Pisignano *et al.*, *Nanotechnology* **15**, 766 (2004).
- [9] H. Kikuta *et al.*, *J. Opt. Soc. Am. A* **15**, 1577 (1998).
- [10] D. Dias *et al.*, *J. Opt. A : Pure Appl. Opt.* **3**, 164 (2001).
- [11] P. Lalanne and G. M. Morris, *Nanotechnology* **8**, 53 (1997).

본 글은 “이기동, 안세원”,님의 물리학과 첨단기술 10월호 (2004) 내용을 요약 한 것으로 보다 자세한 내용은 참고문헌을 참조하시기 바랍니다.