

Nanoimprint Lithography 기술의 이해

강신일(연세대학교 기계공학부)

1. 나노임프린트 리소그래피 기술의 배경 및 소개

DRAM(Dynamic Random Access Memory) 등 반도체 제품의 대량생산을 위한 Lithography 기술의 개발이 비약적으로 이루어져왔다. DRAM의 집적도는 3년 주기로 4배씩 증가하여 왔고, 이에 요구되는 미세 선폭을 지닌 패턴을 제작하기 위한 다양한 마이크로/나노 패턴 제작 기술에 관한 많은 연구가 진행되고 있다. 그림 1은 반도체 공정에 있어서의 극미세 패턴 제작을 위한 리소그래피 기술 로드맵¹⁾을 보여주고 있다.

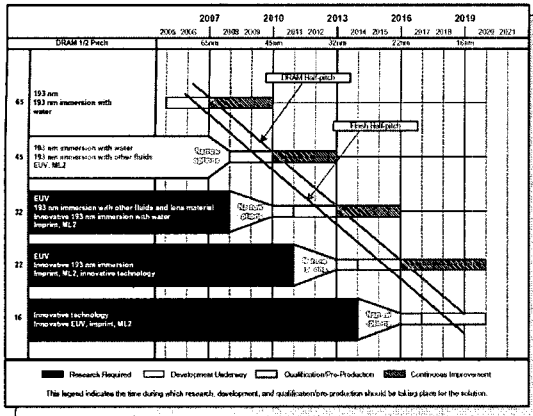
기존의 미세 패턴 제작 방법으로 포토마스크(photomask)를 이용하여 선택적으로 빛을 포토 레지스트 상에 조사하여 패턴을 제작하는 기술인 광학 리소그래피(Photolithography) 기술이 있다. 이는 미세패턴의 대량생산이 가능한 기술이지만, 그림 2에서 보여주는 바와 같은 빛의 회절 현상으로 절대적인 분해능의 한계인 회절한계가 발생하며 이의 극복이 어려워 광학 리소그래피를 통해서 특정크기 이하의 구조물을 제작하는 것이 불가능하다고 할 수 있다.

이러한 문제를 극복하고자 다양한 전자빔 리소

그래피(E-beam lithography)²⁾, X-ray lithography, FIB(focused ion beam) milling³⁾ 등의 나노 패턴 기술들이 개발된 바 있다. 이와 같은 나노 패턴 기술들을 응용하여 특정크기 이하의 미세한 나노 패턴의 제작이 가능해졌지만, 고가의 장비를 필요로 하며, Direct writing 방식으로서 많은 공정시간이 소요되는 한계가 있다.

앞서 제기된 기술들의 단점들을 보완할 수 있는 기술로 반도체 제품 생산에 있어서 나노임프린트 리소그래피(Nanoimprint lithography) 방식이 응용되고 있다. 나노임프린트 리소그래피 기술은 프린스턴대학의 Stephen Y. Chou 교수가 제안한 나노 복제 기술로서 기존의 나노 패턴 기술들에 비하여 상대적으로 제작 단가가 낮고 공정 시간이 짧은 장점을 지닌다⁴⁾. 나노임프린트 리소그래피 방법은 몰드 표면의 나노크기 형상을 레지스트(Resist)에 복제하는 공정인 임프린트 공정과 임프린트 공정 후 남은 잔여층(Residual layer)를 제거하는 패턴 트랜스퍼(Pattern transfer) 공정으로 이루어진다.

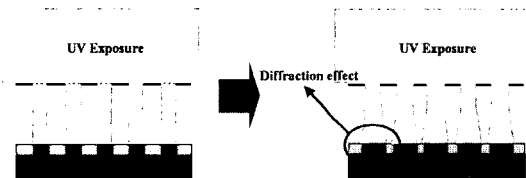
나노임프린트 리소그래피 기술을 응용하기 위해서는 최종 나노 복제품과 반대형상을 지닌 나노몰드를 제작하는 기술이 요구되며, 이러한 나



EUV and lithography friendly design rules will be used with all optical lithography solutions, including with immersion, therefore, not explicitly noted.

Figure 67 Lithography Exposure Tool Potential Solutions

〈그림 1〉 반도체 공정에 있어서의 극미세 패턴 제작을 위한 패턴링 기술 및 나노 임프린트 기술의 동향⁽¹⁾



〈그림 2〉 광학식 리소그래피 공정에서 극미세 패턴 제작시 빛의 회절현상에 의한 절대적인 분해능 한계 발생

노몰드의 성능은 최종 복제되는 나노 패턴의 성능을 결정한다. 나노임프린트 리소그래피를 위한 몰드는 주로 SiO₂, 석영, 금속 등의 경한 재질로 제작된다. 이를 위해 E-beam lithography, Laser lithography, FIB 및 RIE 등의 나노 패턴링 방식이 응용될 수 있다. 또한, 다양한 나노 패턴링 공정을 이용하여 초기 패턴을 제작하고, 전기주조를 통해 금속 나노 몰드를 제작할 수도 있다⁽²⁾.

나노임프린트 리소그래피 기술을 이용한 패턴의 성형에 있어서 몰드 표면과 폴리머 사이에

형성되는 접착(Sticking) 현상 등의 계면 현상은 성형되는 최종 폴리머 패턴의 표면 품질 및 형상 특성에 중요한 영향을 미칠 수 있다. 이에 소수성(Hydrophobic)의 표면 특성을 지닌 자기조립단분자막(self-assembled monolayer) 등의 점착방지막을 몰드 상에 증착하여 표면 에너지를 감소시킴으로 이형 특성을 향상시키는 기술이 요구된다⁽³⁾. 그리고 집적회로(integrated circuit) 등의 제작에서 높은 오버레이 정밀도(high overlay accuracy)가 필수적으로 요구됨으로 다층 위치 정렬 정밀도를 높이는 기술 또한 필요하다⁽⁴⁾.

본 논문에서는 나노임프린트 리소그래피 기술에 사용될 몰드 제작 기술과 나노 임프린트 기술, 이형특성 향상기술 및 위치 정렬 정밀도 향상 기술에 대해 소개하고자 한다. 또한, 나노임프린트 기술을 응용하여 제작 가능한 고밀도 패턴드 미디어, 광자 결정 도파로 어레이 등의 응용 예를 소개하고자 한다.

II. Nanoimprint lithography 기술들

나노임프린트 리소그래피 기술은 몰드표면의 나노크기 형상을 레지스트(Resist)에 복제하는 공정인 임프린트 공정과 임프린트 공정 후 남은 잔여층(Residual layer)을 제거하는 패턴 트랜스퍼(Pattern transfer) 공정으로 이루어진다. 사용되는 폴리머는 열에 변형되거나 자외선 등의 빛에 경화된다. 열에 변형되는 폴리머를 사용할 경우 Thermal nanoimprint lithography 기술을 이용하여 나노패턴을 제작할 수 있다. 그리고 자외선에 경화되는 폴리머를 이용하는 UV nanoimprint lithography 기술이 있다.

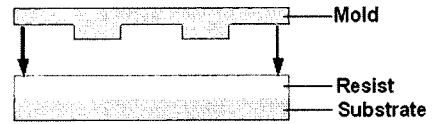
1. Thermal nanoimprint lithography

Thermal nanoimprint lithography 기술은 프린스턴 대학의 Stephen Y. Chou 교수에 의하여 제안된 방식이다⁴⁾. 그림 3은 Thermal nanoimprint lithography 기술의 공정순서이다. 먼저 몰드를 폴리머 레지스트로 압착하며 폴리머의 유리화 온도(glass-transition temperature, T_g) 이상으로 가열한 후 냉각과정을 거친다. 이 과정에서 폴리머 레지스트 표면에 몰드의 나노패턴 형상이 복제된 후, 폴리머 레지스트 층과 몰드가 이형된다. 임프린트 공정 후에 폴리머 레지스트 상에 남아 있는 잔여층(residual layer)을 이방성 건식 식각 공정을 통하여 제거한다. 그림 4.(c)는 Thermal nanoimprint lithography 및 lift-off 기법을 통해 제작된 금속 패턴을 보여준다. Thermal nanoimprint lithography 기술을 통하여 많은 나노 크기의 구조물과 패턴을 복제하는 다양한 방법이 제안되었으며 기술의 단순성과 정밀한 전사특성으로 인해 lithography 방식의 하나로 각광을 받고 있다.

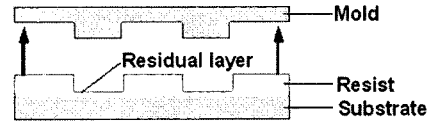
2. UV nanoimprint lithography

UV nanoimprint lithography 기술은 광경화 폴리머를 사용하여 자외선을 통해 경화시키는 임프린트 방식이다. 이 UV nanoimprint lithography 기술은 높은 온도 및 압력 조건에서 공정이 진행되는 Thermal nanoimprint lithography 방식과 달리 상온 및 저압 조건에서 공정에서의 진행이 가능하다. 이와 같은 장점으로 인해, 공정 시간을 단축시킬 수 있고 다양한 재료의 몰드를 사용할 수 있는 장점을 지닌다. 이 기술은 한번의 공정으로 나노 패턴을 기판상의

1. Pressing mold with heat



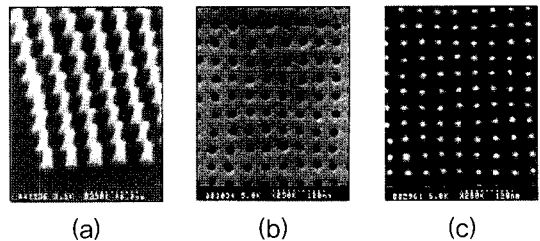
2. Remove mold



3. Pattern transfer using reactive ion etching



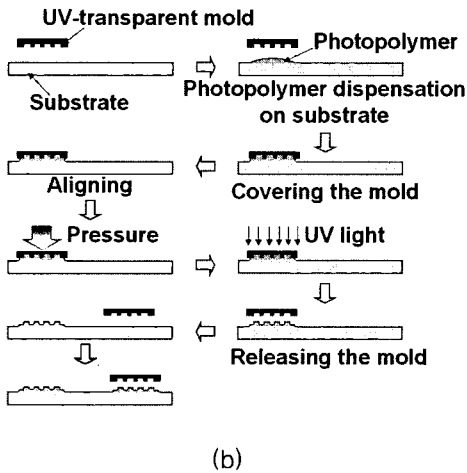
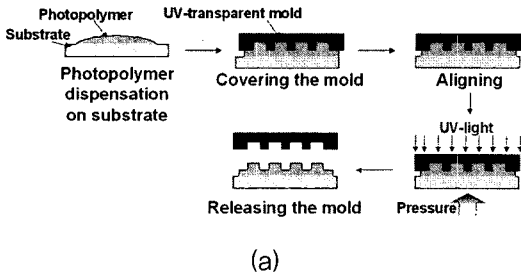
〈그림 3〉 Thermal nanoimprint lithography 공정 순서



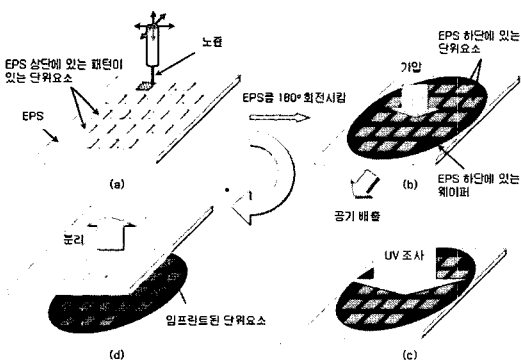
〈그림 4〉 Thermal nanoimprint lithography:

(a) 10nm 직경 40nm 간격의 pillar 어레이 실리콘 마스터 패턴, (b) 복제된 polymer 패턴, (c) lift-off로 구현된 금속 패턴^[4]

전 면적에 제작하는 방법과 여러번의 공정을 계속적으로 수행하여 전 기판상에 패턴을 성형하는 방법이 있다. 그림 5(b)는 step-and-repeat 공정과 같은 반도체 대량생산 기법과 비슷한 공정인 step-and-flash 공정 기법⁷⁾을 통해 대면적의 나노 패턴을 제작하는 공정을 보여준다. 또한 한번의 공정으로 대면적의 나노패턴을 제작할 수 있는 방법으로서 elementwise patterned stamp



〈그림 5〉 (a)single-step UV nanoimprint lithography 공정 개념도, (b)Step-and-flash nanoimprint lithography 공정 개념도



〈그림 6〉 EPS를 사용한 UV nanoimprint lithography 공정의 개념도^[8]

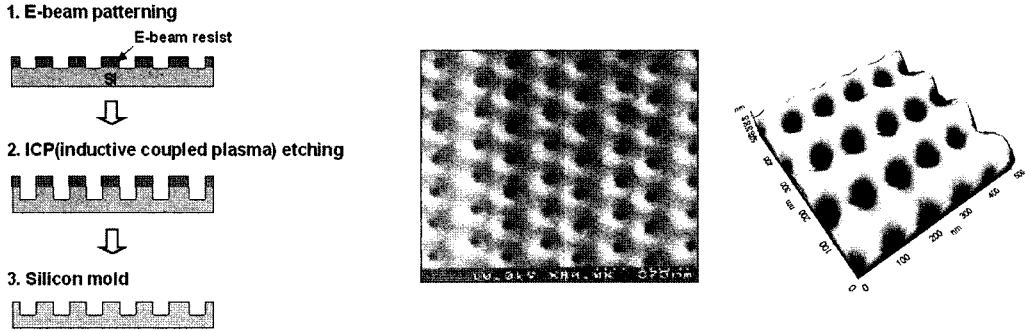
(EPS)를 이용하는 기술^[8]이 있다. 이는 그림 6에 서와 같이 스탬퍼의 나노패턴이 각인되어 있는 단위요소(element)들 간에 채널이 존재하여 임프린트 시 요소영역에 있는 공기가 쉽게 빠져 나갈 수 있도록 하면서 표면에 점착방지층을 형성시켜 이형을 용이하게 한 특징을 가지고 있다.

III. 나노 몰드(나노 스탬프) 제작기술

나노임프린트 리소그래피를 하기 위해서는 먼저 제작하고자 하는 형상의 반대 형상을 갖는 몰드가 있어야 한다. 이러한 몰드의 표면 품질, 균일도, 평탄도 등의 특성은 최종 성형품의 품질에 큰 영향을 미친다. 왜냐하면 몰드의 표면 형상이 성형품에 전사되어 나타나기 때문이다. 몰드는 주로 SiO_2 및 석영으로 제작되며, 이는 전자빔 리소그래피 기술을 이용하여 초기 패턴을 제작하고, lift-off 및 이방성 건식 식각(RIE) 등의 공정을 통해 제작된다, 그리고 FIB milling 기술을 이용 직접 소재를 가공하여 몰드를 제작할 수 있다^[6]. 또한 다양한 나노 패터닝 공정을 이용하여 초기 패턴을 제작하고, 기지층 증착 및 전기구조를 통해 금속 나노 몰드를 제작할 수도 있다^[6].

1. 전자빔 리소그래피(E-beam lithography) 기술을 이용하는 방법

나노 패터닝 기술로써 가장 널리 이용되는 E-beam lithography 방법은 전자빔에 의해 감광되는 PMMA와 같은 resist를 사용하여 전자빔이 조사된 부분을 향후 현상공정에서 제거하는 방법이다. 전자빔의 작은 spot size로 인해 일반적으로 6nm 정도의 패턴 구현이 가능한 것으로 알려진 E-beam lithography 기술은 알려진 어떤



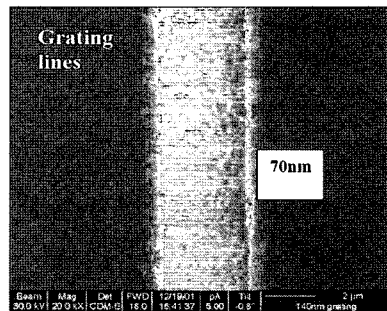
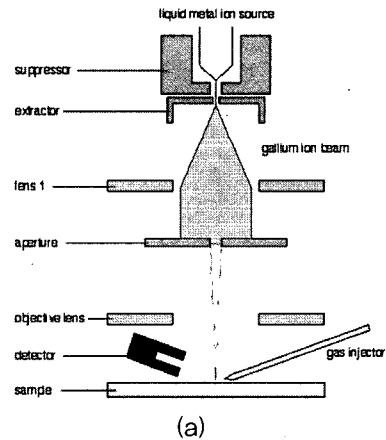
〈그림 7〉 전자빔 리소그래피 및 RIE 기술을 이용한 몰드 제작 방법 및 결과:

(a)공정 순서, (b)제작된 실리콘 몰드 표면의 지름 50nm, 간격 95nm 홀 패턴의 SEM 및 AFM 사진

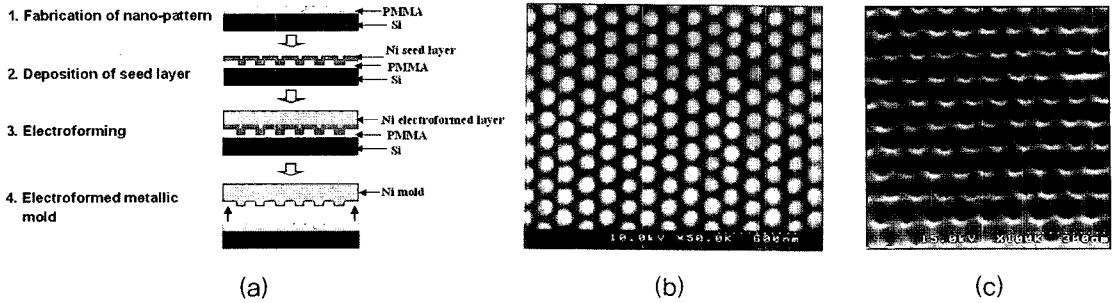
나노 패터닝 기술보다 작은 크기의 나노 패터닝이 가능하다. 그림 7은 E-beam lithography 및 ICP(Inductive Coupled Plasma)를 응용한 실리콘 몰드의 제작 공정을 보여준다. 먼저 전자빔 리소그래피 기술을 이용하여 초기 패턴을 제작하고 이방성 건식식각 공정을 통해 초기 패턴의 형상을 Si, SiO₂ 또는 석영으로 전사시켜 최종 실리콘 몰드를 제작한다^[2].

2. Focused ion beam(FIB) milling 기술을 사용하는 방법

Focused ion beam milling^[3]은 이온빔(ion beam)을 응용하여 나노패턴을 제작하는 방법으로 기판의 종류에 관계없이 어떤 재료라도 직접 가공할 수 있다. 이로 인해 FIB 공정을 응용할 경우, RIE 공정이 없이 경한 재질의 몰드를 직접 가공할 수 있으므로 몰드 제작 공정이 단순해지며, 다양한 재료의 몰드를 만들 수 있는 장점이 있다. 그림 8에서와 같이, 이온 소스에서 나온 이온빔을 개구를 통해 조사량(ion dose)을 제어하고, 전기장 또는 자기장을 외부에서 걸어



〈그림 8〉 FIB milling 기술을 이용하여 몰드를 만드는 방법: (a)FIB milling 개념도, (b)제작된 두께 70nm 폴리실리콘 그레이팅(Grating) 패턴의 SEM 사진^[3]



(그림 9) 폴리머 마스터를 제작한 후 도금공정을 통하여 스탬퍼를 만드는 방법: (a)공정 순서, (b)제작된 폴리머 패턴상의 지름 50nm, 간격 95nm인 원기둥 패턴의 SEM 사진, (c)제작된 금속 나노 몰드 표면상의 지름 50nm, 간격 95nm인 홀 패턴의 SEM 사진

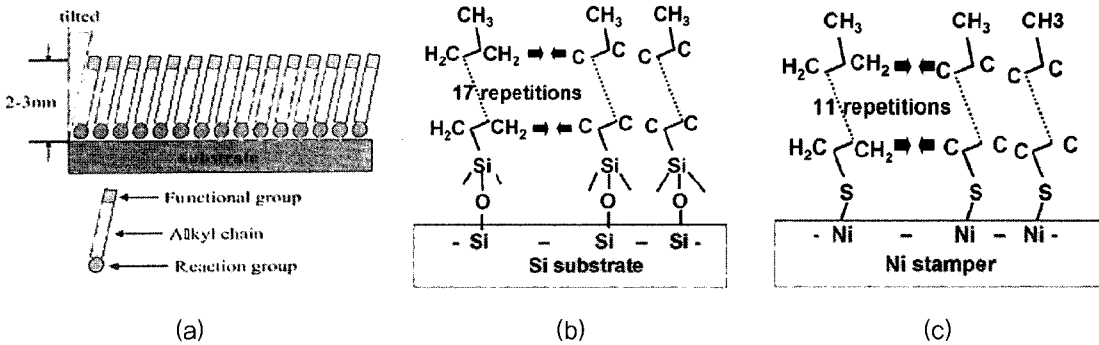
주어 이온빔이 조사되는 위치를 제어한다. FIB 공정에서, 이온빔이 조사되는 시간, 동일 위치의 가공 횟수, 이온빔의 집속 크기 등을 조절함으로써 가공의 깊이 및 크기 등을 조절할 수 있다.

3. 전기주조(electroforming)를 이용하는 방법

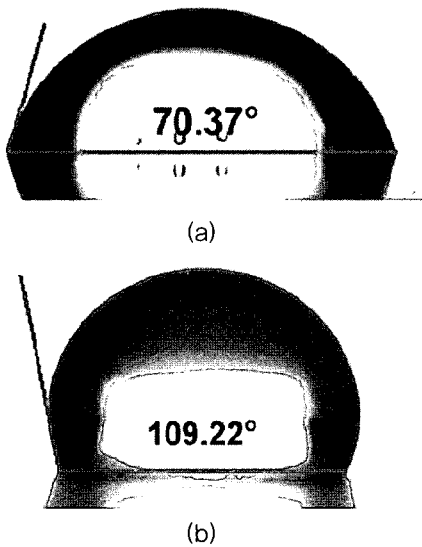
실리콘이나 석영(quartz)은 경도가 우수한 반면 취성이 강한 재료로서, 나노임프린트 리소그래피 공정 중에 발생하는 주기적인 압력과 열을 견디기 어려워 몰드로서의 수명이 짧은 단점이 있다. 실리콘이나 석영에 비해 니켈(nickel) 등의 금속 재료는 이러한 몰드의 수명 문제를 해결할 수 있는 재료이다. 전기주조(electroforming)를 이용하여 몰드를 제작하는 방법은 몰드재료로서 실리콘이나 석영 외에 금속으로 몰드를 제작할 수 있는 기술이다. 그림 9(a)에서와 같이 먼저 나노패턴을 제작하고 기지층(seed layer) 증착 및 전기주조를 통해 금속 나노 몰드를 제작할 수 있다¹⁶⁾.

IV. 이형특성 향상 기술

나노임프린트 리소그래피 기술을 이용한 패턴의 성형에 있어서 몰드 표면과 폴리머 사이에 형성되는 점착현상 등의 계면 현상은 성형되는 폴리머 패턴의 표면 품질 및 형상 특성에 중요한 영향을 미친다. 패턴의 크기가 줄어들어 따라 자기조립단분자막(self-assembled monolayer)을 몰드 상에 증착하여 표면 에너지를 감소시킴으로써 이형특성을 향상시키는 기술이 요구된다¹⁷⁾. 자기조립단분자막은 두께 2-5nm의 물리화학적 으로 안정한 물질로 몰드의 표면특성을 패턴형상의 변화 없이 변화시킬 수 있다. 그림 10(a)에서와 같이 자기조립단분자막은 기관과 화학적으로 반응하는 부분인 reaction group, 몸통부분에 해당하는 alkyl chain, 표면특성을 나타내는 functional group로 구성되어있다. 자기조립단분자막의 종류는 크게 silane 계열과 thiol 계열로 나눌 수 있다. silane 계열은 실리콘이나 석영 등과 같은 재질에 화학적으로 반응하는 head group을 가진 것이고 thiol 계열은 금, 은, 니켈 등과 같은 금속 재료에 화학적으로 반응하는 head



〈그림 10〉 (a)자기조립단분자막의 구조, (b)silane 계열 자기조립단분자막이 실리콘 기판상에 형성된 구조, (c)thiol 계열 자기조립단분자막이 니켈 기판상에 형성된 구조^[5]



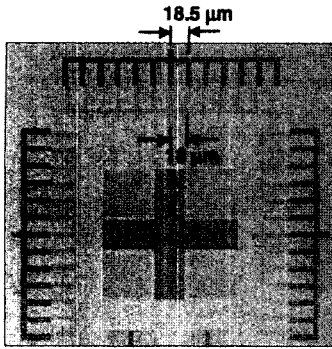
〈그림 11〉 (a)니켈 몰드의 contact angle, (b)자기조립단분자막이 표면에 형성된 니켈 몰드의 contact angle^[5]

group을 가진 자기조립단분자막이다. 사용하는 몰드의 재료에 따라 silane 계열, thiol 계열의 자기조립단분자막을 선택적으로 사용 몰드의 표면특성을 변화시켜 이형특성을 향상시킬 수 있다.그림 10(b)와 그림10(c)는 각각 silane 계열, thiol 계열의 자기조립단분자막이 실리콘 기판

과 니켈 기판에 형성된 것을 표현한 도식도이다. 표면의 이형특성 변화는 contact angle을 측정하여 확인할 수 있으며 contact angle이 클수록 이형특성이 우수하다고 할 수 있다. 그림11에서 니켈 몰드상에 자기조립단분자막을 형성한 후에 증가된 contact angle을 확인할 수 있으며 이에 따라 이형특성이 향상됨을 알 수 있다.

V. 다층 위치 정렬 정밀도 향상기술

집적회로(integrated circuit)의 제작에서 높은 오버레이 정밀도(high overlay accuracy)가 필수적으로 요구된다. 나노임프린트 리소그래피 기술로 단층 나노패턴의 resolution은 10nm이하 구현이 가능하나 다층으로 구조물을 제작할 시에 층간의 위치 정렬 정밀도를 구현이 어려워 많은 연구가 진행되고 있다. 위치 정렬 오차의 발생 요인은 임프린트 공정시에 생길 수 있는 몰드와 폴리머 사이의 상대적인 기계적 위치 이동, 몰드와 폴리머의 열팽창계수 차이에서 발생하는 misalignment, 몰드와 폴리머의 휨 현상으로 인한 상대적인 위치이동 그리고 임프린트 공정



〈그림 12〉 1μm 미만의 위치 정렬 정밀도로 제작된 다층 나노임프린트 리소그래피 결과⁶⁾

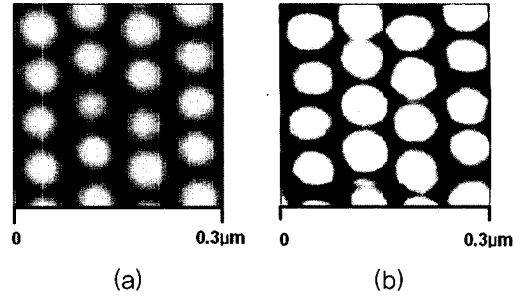
시 전면적의 온도 균일도가 제어되지 못하여 생기는 각 부분의 서로 다른 위치이동 등이다⁶⁾. 이러한 위치 정렬 정밀도를 떨어뜨리는 요인들의 고려가 필요하다. 그림 12는 이러한 요인들을 고려하여 제작된 다층 정렬된 나노임프린트 리소그래피 결과로서 1μm미만의 위치 정렬 정밀도를 보여주고 있으며 옅은 색깔의 패턴은 첫번째 나노임프린트 리소그래피로 제작된 것이고 짙은 색깔의 패턴은 두번째 나노임프린트 리소그래피로 제작된 것이다⁶⁾.

VI. 나노임프린트 리소그래피의 응용분야

Nanoimprint lithography는 기존의 광학 리소그래피 공정이 지닌 분해능의 한계를 극복할 수 있는 기술이다. 이러한 나노임프린트 리소그래피 기술의 몇가지 응용 예를 소개한다.

1. Patterned media

패턴드 미디어는 일정한 방향의 자성을 갖는 나노 단위의 패턴을 제작함으로써, 기존의 연속적인 자성 박막을 이용하여 정보를 저장하는 방

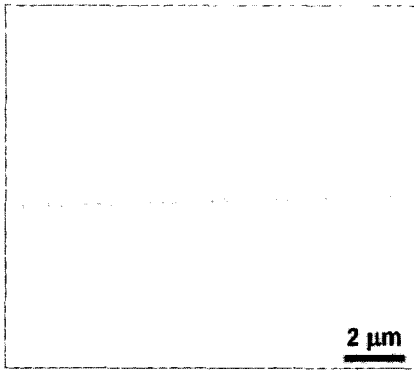


〈그림 13〉 직경 40nm 급 패턴드 미디어에서 자성 나노패턴의 (a)AFM 사진, (b)MFM 사진

식이 갖는 초상자성 효과 및 노이즈 문제를 해결할 수 있는 차세대 정보저장매체이다. 패턴드 미디어(patterned media)의 제작시, 대용량의 정보를 고밀도로 저장시키기 위해서 미디어 기판 위에 나노 단위의 패턴이 요구된다. 이러한 패턴드 미디어를 제작하는 방법에는 여러 가지 방법이 있겠으나 직접 가공하여 증착하는 것에 비하여 복제 방식인 나노임프린트 리소그래피가 제작 단가측면에서 더 유리하다. 나노임프린트 리소그래피 공정을 이용하여 나노 크기의 양각 패턴을 만들고 그 위에 자성층을 증착하여 제작할 수 있다²⁾. 그림13에서 실제 제작된 40nm 급 패턴드 미디어(100 Gbits/in²)를 볼 수 있다.

2. Photonic crystal

광자 결정 도파로 (photonic crystal waveguide)는 광자 결정(photonic crystal)의 광자띠간격(photonic band gap)을 이용한 새로운 개념의 도파로이다. 전반사 원리를 이용한 기존의 도파로는 굴곡이 심한 부분에서 큰 도파손실을 보이는 반면, 광자 결정 도파로는 거의 손실 없이 광을 도파시킬 수 있으며 인접한 광자 결정 도파로



〈그림 14〉 Thermal nanoimprint lithography 방법으로 제작된 Photonic crystal 도파로^[10]

간의 cross-talk도 기존의 도파로에 비해 상당히 작다. 이러한 특성으로 말미암아 광자 결정 도파로는 차세대 광집적회로 구현에 있어 매우 중요한 역할을 할 것이라 여겨지고 있다. 광자 결정 도파로는 주로 RIE 혹은 ICP, 등 직접적인 식각 방법을 이용하여 제작되어 왔다. 하지만 이러한 제작방법은 고가의 공정이 요구되며 대량생산에도 적합하지 못한 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하는 기술로 나노임프린트 리소그래피 방법이 있다. 그림 14는 thermal nanoimprint lithography 기술을 이용하여 제작된 광자결정 도파로이다^[10]. 이 제작기술은 광자 결정 도파로 뿐만 아니라 필터, 분할기, 스위치 등 다양한 광자 결정 광소자 제작과 나아가, 그러한 소자들이 집적된 광집적회로를 제작하는데도 매우 유용할 것으로 기대된다.

Ⅶ. 결 론

본 논문에서는 기존의 광학 리소그래피 기술의 분해능 한계를 극복할 수 있는 양산 기술 중 하나로 연구 개발되고 있는 나노 임프린트 리소

그래피 기술에 관하여 살펴보았다. 먼저 나노 임프린트 리소그래피 기술들인 thermal nanoimprint lithography와 및 UV nanoimprint lithography에 관하여 소개하였다. 이러한 나노 임프린트 리소그래피 기술을 위해서는 제작하고자 하는 최종 제품의 형상과 반대 형상을 갖는 표면폼위, 균일도, 평탄도 등이 우수한 나노몰드가 필요하며, 이에 나노몰드 제작을 위한 기술들을 소개하였다. 그리고 나노몰드와 폴리머 성형품 사이의 이형특성 향상을 위한 자기조립단분자막 응용기술을 소개하였고 나노임프린트 리소그래피 공정에서 다층간 위치정렬 오차의 발생요인을 살펴보았다. 또한, 나노임프린트 리소그래피 기술의 응용 가능한 예로 고밀도 패턴드 미디어, 광자 결정 도파로 등을 살펴보았다.

나노임프린트 리소그래피 기술을 이용한 나노 패턴 복제 방법의 발전을 위해서는 우수한 성능의 나노몰드 제작기술, 이형기술 및 다층간 나노정렬 기술의 연구가 함께 이루어져야 한다. 전자빔 리소그래피, FIB 및 전기주조 등의 기술을 통해 우수한 나노몰드의 제작의 가능하다. 그리고 나노몰드와 폴리머 성형품 사이의 이형특성 향상을 위해 자기조립단분자막을 응용함으로써 표면에너지가 감소하여 이형특성의 향상이 가능하며, 층간 위치정렬오차를 발생시키는 요인들을 고려하여 설계/제작된 기기를 통해 다층간의 위치정렬오차 문제가 극복될 수 있다. 이러한 나노임프린트 리소그래피 기술은 다양한 나노 디바이스 제작으로의 응용을 기대할 수 있다.

≡≡≡ 참고 문헌 ≡≡≡

- [1] <http://www.itrs.net/Common/2005ITRS/Litho2005.pdf>

- [2] Namseok Lee, Youngkyu Kim, Shinill Kang, Jongill Hong, "Fabrication of metallic nano-stamper and replication of nano-patterned substrate for patterned media", *Nanotechnol.*, 15, 901-906, 2004.
- [3] Biao Li, Huimin Xie, Xin Zhang, "Focused Ion Beam Nano-Machined Structures For Strain Analysis By A Moire Technique", *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, 741, 199-204, 2003.
- [4] Stephen Y. Chou, Peter R. Krauss, Wei Zhang, Lingjie Guo, Lei Zhuang, "Sub-10 nm imprint lithography and applications", *J. Vac. Sci. Technol. B*, 15, 6, 2897-2904, 1997.
- [5] Namseok Lee, Sungwoo Choi, Shinill Kang, "Self-assembled monolayer as an antiadhesion layer on a nickel nanostamper in the nanoreplication process for optoelectronic applications", *Appl. Phys. Lett.*, 88, 073101, 2006.
- [6] Wei Zhang, Stephen Y. Chou "Multilevel nanoimprint lithography with submicron alignment over 4 in. Si wafers", *Appl. Phys. Lett.*, 79, 6, 845-847, 2001.
- [7] David P. Mancinia, Kathleen A. Gehoskia, William J. Daukshera, "Analysis of critical dimension uniformity for step and flash imprint lithography", *Proc. SPIE*, 5037, 187-196, 2003.
- [8] Jun-ho Jeong, Young-suk Sim, Hyonkee Sohn, Eung-sug Lee, "UV-nanoimprint lithography using an elementwise patterned stamp", *Microelectron. Eng.*, 75, 2, 165-171, 2004.
- [9] Chul-Sik Kee, Sang-Pil Han, Keun Byoung Yoon, Choon-Gi Choi, Hee Kyung Sung, Sang Soon Oh, Hae Yong Park, Sunggook Park, Helmut Schiff, "Photonic band gaps and defect modes of polymer photonic crystal slabs", *Appl. Phys. Lett.*, 86, 051101, 2005.

저자소개



강 신 일

1981년-1986년 고려대학교 (기계공학), 학사
 1987년-1990년 Univ. of Minnesota (Mechanical Eng.), M.S.
 1990년-1994년 Cornell Univ.(Mechanical Eng.), Ph.D.
 1994년-1995년 미국 코넬대, Cornell Injection Molding Program, Postdoctoral Research Associate
 1995년-현 재 연세대학교, 공과대학, 기계공학부, 교수
 1997년-2006년 정보저장기기연구센터 (과학재단 지정 우수연구센터), 연구원, 연구부장
 2002년-2005년 과학기술부 21세기 뉴프론티어 나노메카트로닉스 사업, 세부주관기관 사업 책임자
 2002년-2004년 연세대학교 대학원, 정보저장공학 협동과정, 주임교수
 2004년-현 재 과학기술부 국가지정 연구실 사업(NRL), 연구책임자
 주관심분야 나노 복제 및 광부품 설계/제작