

롤타입 마스크를 이용한 연속 포토리소그래피 기술과 그 응용[§]

곽 문 규^{*†}

* 경북대학교 기계공학부

Continuous Photolithography by Roll-Type Mask and Applications

Moon Kyu Kwak^{*†}

* School of Mechanical Engineering, Kyungpook Nat'l Univ.

(Received May 30, 2012 ; Revised August 21, 2012 ; Accepted August 13, 2012)

Key Words: Continuous Process(연속공정), Roll to Roll(롤투롤), Photolithography(포토리소그래피)

초록: 본 논문에서는 롤타입 마스크를 사용한 마이크로/나노 구조 제작용 광학 리소그래피 방법을 소개한다. 이 생산 방법은 다양한 목표 해상도에 따라 위상지연 리소그래피방법과 포토리소그래피로 나뉜다. 사용되는 빛의 파장대보다 작은 해상도를 갖는 패턴을 제작하기 위해서 실린더 형태의 위상지연 마스크를 활용한 근거리 노광 방식을 사용한다. 또한 필름 형태의 금속 마스크를 써서 포토리소그래피를 연속 방식으로 수행하였는데 이 방식은 실린더 마스크의 회전수를 조절함으로써 노광 결과 패턴의 주기를 실시간으로 조절할 수 있다. 이 기술의 응용으로 금속 그물패턴으로 만들어진 100 mm² 넓이의 투명전극을 제작하였다.

Abstract: We report the development of an optical micro-/nanolithography method by using a roll-type mask. It includes phase-shift lithography and photolithography for realizing various target dimensions. For sub-wavelength resolution, a structure is achieved using the near-field exposure of a photoresist through a cylindrical phase-mask, allowing high-throughput continuous patterning. By using a film-type metal mask, continuous photolithography was achieved, and this method could be used to control the period of resultant patterns in real time by changing the rotating speed of the cylinder mask. As an application, we present the fabrication of a transparent electrode in the form of a metallic mesh by using the developed roll-type photolithography process. As a result, a transparent conductor with good properties was achieved by using a recently built cylindrical phase-shift lithography prototype, which was designed for patterning on 100-mm² substrates.

- 기호설명 -

- ϕ : 위상 이동량
- λ : 파장
- n : 굴절률
- h : 구조물 높이

1. 서 론

최근 많은 미세구조 제작기법들이 발명되고 실제 산업에 응용이 됨에 따라 롤투롤 기반의 생산

기법과 같이 연속적인 공정이 가능한 시스템 개발에 대한 수요가 증가하고 있다.⁽¹⁻⁴⁾ 현재 산업계에서 가장 널리 사용되고 있는 전통적 미세구조 생산 기법인 포토리소그래피는 최근 특정 응용 영역에서 그 활용 범위를 넓히고 있는 비전통적 생산 공정들에게 일정 부분의 공정을 양보하고 있지만 여전히 가장 중요한 생산 방법임에는 이견이 없다. 하지만 현재 포토리소그래피는 실리콘 웨이퍼 단위로 공정이 진행 되기 때문에 로딩, 언로딩 등의 과정이 있어 연속 공정으로 진행 되기가 어렵다. 또한 딱딱한 표면에만 공정이 진행 되고 있어 현재 시제품들이 개발되고 있는 Flexible display 나 전자종이 등에 적용하는 데에 한계가 있다. 미세구조 제작에 있어 포토리소그래피와 함께 널리 쓰이고 있는 방법 중 하나인 나노임프린트의 경우에는 웨이퍼 크기의 면적을 제작하던 공정을 롤투롤

§ 이 논문은 2012년도 대한기계학회 마이크로/나노공학 부문 춘계학술대회(2012. 5. 17.-18., KIMM) 발표논문임

† Corresponding Author, mkkwak@knu.ac.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

공법을 적용하여 대면적에 연속적으로 높은 수율의 생산을 가능하게 하는 연구가 많이 진행되었고 실제 많은 연구진들에 의해 실용화에 대한 노력이 이루어지고 있다.^(3,4) 이 밖에 유연기관에 포토리소그래피를 적용함에 있어 기관자체의 변형이 후속공정에서의 정렬 불량으로 이어질 수 있어 이에 대한 연구가 더욱 진행되어야 한다.⁽⁵⁾

나노 임프린트에 비해 상대적으로 제작 물질이나 응용 분야 등이 오랫동안 발전되어온 포토리소그래피를 연속공정으로 발전시킬 수 있다면 현재의 생산 방식 자체를 바꿀 수 있으리라 예상된다. 이에 본 연구 논문에서 대량 생산이 가능한 롤투롤 포토리소그래피의 가능성을 알아보고 향후 발전 방향에 대해 고찰해 보고자 한다. 또한 그 대표적 응용분야인 디스플레이 부품 시제품을 생산해보고 실제 산업 적용 가능성에 대해 알아본다.

본 연구를 통해 제작된 롤 타입의 연속 포토리소그래피는 목표하는 한계 해상도에 따라 두 가지 종류의 기술로 구성된다. 첫번째 방식은 500 nm 이하의 한계 해상도 구현을 목표로 하는 롤타입 위상 이동 리소그래피(roll type phase shift lithography)⁽⁵⁾이고 두번째 방식은 그 이상의 sub-micron 크기와 마이크로 단위의 구조물 제작을 목표로 하는 롤타입 포토리소그래피(roll type photolithography)이다. 롤타입 위상 이동 리소그래피는 최대 200 nm 까지 해상도를 높일 수 있다. Stepper 나 Scanner 등을 포함하여 극단파장의 광원을 사용하는 방법을 제외한 일반적인 자외선(350 nm~400 nm)을 사용하고 있는 보통의 포토리소그래피의 한계 해상도는 대략 600 nm 정도로 알려져 있다. 본 연구진은 365 nm의 파장을 갖는 단파장 자외선 광원을 사용하여 200 nm부터 수십 마이크로미터에 이르기까지의 다양한 크기의 미세 구조를 롤타입의 위상 이동 리소그래피와 포토리소그래피

기술을 통해 구현하였다. 그리고 그 기술의 응용으로서 디스플레이 장치의 터치 패널 부품으로 사용이 가능한 금속 그물망 구조로 제작된 투명 금속 전극을 개발하였다.

2. 본 론

2.1 연속 생산을 위한 롤타입 포토리소그래피의 기본 장비 제작

실험 장비는 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 롤타입의 마스크 유닛, xyz-stage, 샘플 이송 장치(linear motion actuator), 그리고 UV 노광 유닛으로 구성되어 있었다.

롤타입 마스크 유닛은 퀴즈 실린더와 그 외부에 부착되는 필름형 마스크로 이루어지는데 위상 이동 리소그래피와 롤 타입 포토리소그래피 부분에서 다시 언급하도록 하겠다. 퀴즈 실린더는 90 mm 지름을 가지고 있고 베어링으로 고정 축에 연결되어 있다. 그리고 자외선 광원은 실린더 내부에 고정되어 있고 파장은 365 nm 단일 파장이다. 또한 콜리메이션 렌즈를 사용하여 빛의 방향을 전 노광 면적에 대해 일정하게 조절하였으며 광원의 끝부분에 작은 슬릿을 만들어 이동방향에 수직인 방향의 선광원을 사용할 수 있도록 하였다. 빛의 세기는 컨트롤러로 0~200 mW/cm²까지 조절하였다. 본 실험에서 기관을 이송하는 선속도는 1 cm/s였고 이에 대해 패터닝이 가장 잘되는 광원의 세기는 70 mW/cm²로 실험적으로 찾아냈다. 하지만 이 값은 광원과 기관과의 거리, 사용되는 PR의 종류 및 마스크의 종류에 따라 달라지며 그에 상응하는 최적의 값을 찾을 필요가 있다.

2.2 롤 타입 위상 이동 리소그래피 (roll type phase shift lithography)

미세 구조를 갖는 투명한 위상 이동 마스크를 사용하여 sub-wavelength 크기의 구조를 제작하는 기법은 실제 산업에서도 현재 사용되고 있다. 하지만 그 마스크가 퀴즈(Quartz)로 만들어져 제작비용이 비싸고 대면적의 패턴을 형성하기에 높은 수준의 균일한 접촉이 잘 이루어지지 않아 결점이 발생하는 등의 문제가 있었다. 이 문제를 해결하기 위하여 PDMS를 마스크로 사용하는 연구가 Whiteside 연구팀에 의해 이루어졌다.⁽⁵⁾ PDMS 물질의 특성상 넓은 면적에 균일한 접촉이 가능하였고 매우 낮은 생산비로 마스크를 제작할 수 있었다. 하지만 이 물질은 탄성계수가 매우 낮아서 작은 힘에도 변형이 쉬운 단점이 있다. 위상의 변화값



Fig. 1 Experimental set up for roll type photolithography

은 다음식으로 표현된다.

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta nh \quad (1)$$

그리고 이 식을 통해 계산되는 위상 이동 리소그래피에서 광원의 정확한 반진 위상을 만들기 위해 마스크 구조가 가져야 하는 높이는

$$h = \lambda / (2\Delta n) \quad (2)$$

로 표현된다. 여기서 λ 는 사용된 빛의 파장, Δn 은 사용된 고분자 마스크와 공기의 굴절률 차이이다. 실제 높이 값은 200 nm ~ 500 nm 정도의 값을 가지기 때문에 매우 작은 양의 변형이라 할지라도 그 결과에 많은 영향을 끼치게 된다. 이러한 이유 때문에 PDMS를 이용한 위상 이동 리소그래피는 웨이퍼 단위의 샘플에서는 큰 문제가 되지 않지만 실린더 형태의 마스크를 이용해서 물리적으로 접촉력을 가해서 진행이 되는 롤타입의 시스템에는 적용하는 데에 한계가 있다. 실제 선행 연구 결과로 발표한 수율은 10%라고 밝혀져 있다. 롤타입의 마스크에 적용가능한 위상 이동 마스크를 제작하기 위하여 본 연구진은 Polyurethanacrylate(PUA) (MINS-311, Minuta, co.)를 사용하였다.⁽⁶⁾ Rigiflex mold 라는 이름으로 알려져 있는 PUA는 수십나노급의 구조를 구현해 낼만큼 높은 Elastic modulus를 가지고 있지만 대면적의 패턴 결과물은 필름과 같이 유연한 특성을 가져 실린더형의 마스크를 제작하기에 용이하다. 롤타입의 PUA 위상 이동 마스크를 제작하는 과정은 다음과 같다. 적당량의 PUA pre-polymer를 실리콘 마스터 위에 도포한 다음 PET 필름을 위에 덮고 기포를 롤러로 밀어서 빼준다. 그 후 100 mW/cm²의 세기를 갖는 자외선 (250 nm ~ 400 nm)에 10초간 노광시켜준다. 경화 후 마스터로부터 PUA 몰드를 분리하여 실린더에 감아주면 롤타입 위상 이동 마스크가 완성된다. 사용한 빛의 파장과 PUA의 굴절률(R.I.~1.4)를 고려하여 구조물의 높이는 450 nm로 제작을 하였다. 롤타입 위상 이동 리소그래피의 개략도는 Fig. 2에 설명되어 있다. 진정한 의미의 연속 공정이라면 포토레지스트의 코팅과 현상(development)공정까지 연속적으로 이루어져야하지만 이번 연구에서는 가능성의 파악에 의미를 두고 스핀코팅과 수동 현상으로 공정을 진행 하였다.

포토레지스트를 실리콘 기판 혹은 유리 기판에 코팅하고 공정을 진행하여 얻은 최종 결과구조는 Fig. 3에 전자현미경사진으로 보여지고 있다. 사각형 혹은 원형 마스크 구조에 대해서 Fig. 3(a),(b)의

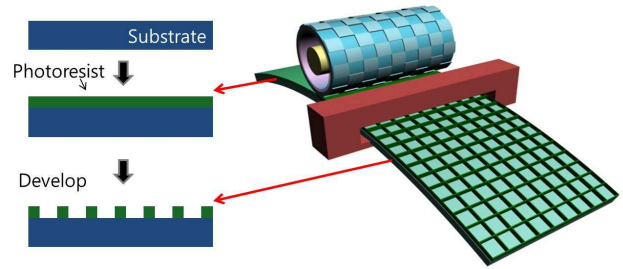


Fig. 2 Schematic illustration of roll type phase lithography

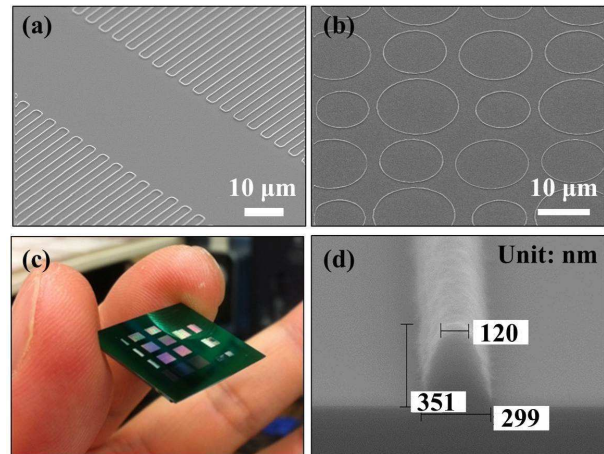


Fig. 3 (a) SEM image of PR pattern by roll type phase lithography with rectangular phase mask, (b) with circular phase mask (c) Photo image of large area patterned sample (d) Cross sectional SEM image of fabricated PR pattern

결과처럼 성공적으로 미세 구조 제작이 되었고 이 구조물들은 사용한 광원의 너비와 직선 이송 장치의 스트로크로 제한되는 패터닝 넓이(10 mm X 10 mm)에 걸쳐 고르게 구현되었다. 또한 이 미세 패턴은 삼각형 단면을 갖는 선으로 꼭지점(100 nm 폭)에서 밑변(300 nm 폭)으로 갈수록 점차 넓어지는 형상을 보여준다.

2.3 롤 타입 위상 이동 리소그래피의 응용

개발된 롤타입 위상 이동 리소그래피의 응용 사례로 금속 그물망 구조를 갖는 투명 전극 (transparent metal electrode, TME)을 개발하였다. 금속 투명 전극은 현재 많이 연구되고 있는 CNT를 이용한 투명 전극이나 그래핀을 이용한 투명전극과 더불어 디스플레이, 태양전지에 사용되고 있는 ITO glass를 대체할 수 있는 부품이다. 위상 이동 리소그래피로 완전히 연결된 그물 구조를 만들기 위해서는 체스판 형태의 구조를 갖는 마스크를 제작할 필요가 있다. 하지만 실리콘 마스터를 제작하는 과정에서 노광과 현상 과정에서 항상 사각형 모서리 부분은 라운딩이 되기 때문에 정확히 그려

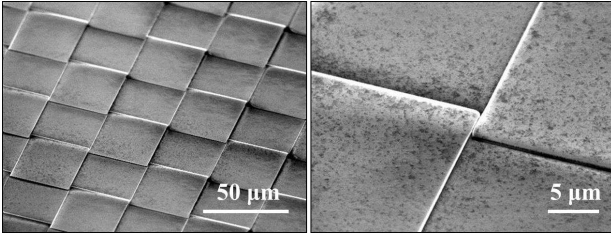


Fig. 4 SEM image of phase mask for mesh pattern (left) and its magnified image (right)

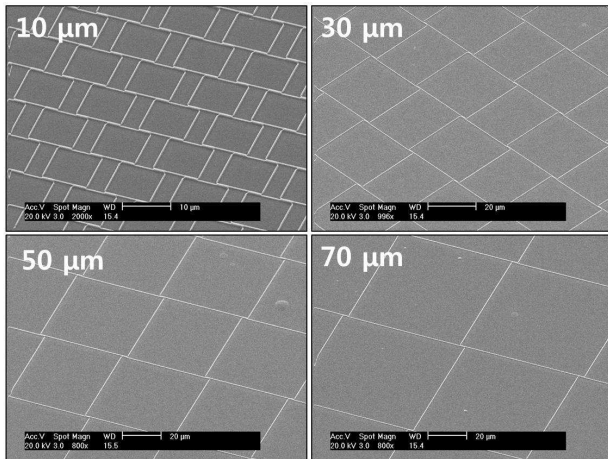


Fig. 5 SEM image of metal mesh structure by roll type phase shift lithography

진 체스판 형태의 구조물은 제작이 불가능하다. 그래서 Fig. 4 와 같은 형태의 겹침이 있는 체스판 형태의 구조물을 위상 이동 마스크로 제작을 하였다. 동일 실험 조건하에서 약 200 nm의 선폭이 형성 된다는 점에서 착안하여(Fig. 3(d)참조) 사각형 구조물 간의 간격을 300 nm로 제작함으로써 노광이 되지 않는 암부를 겹치게 하여 두 사각형 구조로 만들어지는 폐곡선이 자연스럽게 이어질 수 있도록 하였다. 이러한 PUA 몰드는 10, 30, 50, 70 μm의 주기를 갖는 금속 그물망 구조를 만들기 위해 각각의 주기를 갖는 구조물로 제작 되었다. 그리고 그 몰드를 위상 이동 마스크로 사용하여 공정을 진행한 결과물의 SEM 사진이 Fig. 5에 각 주기별로 나타나 있다. 실험에 사용된 금속은 알루미늄으로 400, 600, 800 Å의 세가지 두께로 증착하였고 증착은 E-beam evaporator로 진행하였다.

제작된 샘플의 투명 금속 전극으로서의 성능을 가늠하기 위하여 가시광선 영역에서의 투과도와 면저항을 12 개의 샘플에 대해서 측정하였고 그 결과값이 Fig. 6(a)에 나타나있다. 먼저 투과도는 금속의 두께에 대해서는 큰 변화를 보이지 않고 패턴의 주기에 따라 변화하는 것을 볼 수 있다. 10 μm 주기에서는 약 85 %의 투과도를 나타내고 있고 30 μm 주기 이상의 주기에서는 90 % 이상의

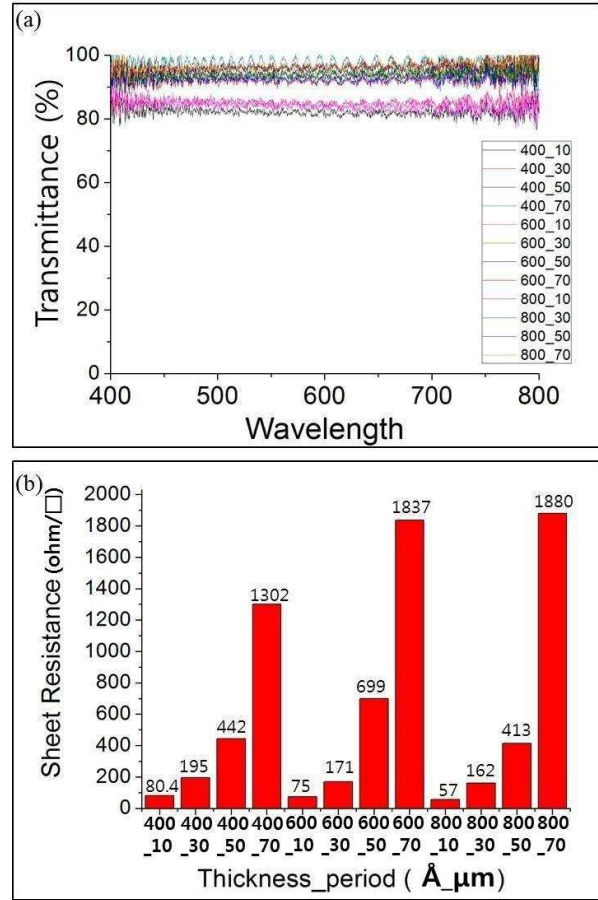


Fig. 6 Performance of fabricated TME (a) Transmittance (b) sheet resistance

투과도를 보인다. 400 Å 두께, 70 μm의 주기를 갖는 샘플의 경우에 97% 가량의 투과도를 보여 최대값을 기록하였다. 이 값은 금속에 대해서 가려진 부분을 고려한 Opening area의 비율로 계산할 수 있는 실제로 계산값보다 측정값이 조금씩 작은 것을 확인할 수가 있다. 10 μm의 opening area를 고려한 투과도는 98%가 되어야하고 70 μm의 경우에는 99% 이상의 투과도를 보여야 한다. 이처럼 계산값보다 낮은 투과도를 보이는 이유는 현상과 금속 식각 과정에서 몇몇 결점이 발생을 하고 두 폐곡선이 만나서 이어지는 부분은 금속선의 두께가 1.5~2 배 가량이 되기 때문에 투과도의 감소가 발생한다고 예측할 수 있다. 비교 기준이 될 수 있는 ITO glass의 경우 투과도가 약 85 %이기 때문에(7) 비교적 투명 금속 전극이 투과도라는 측면에서는 충분히 ITO를 대신하여 사용 될 수 있다는 사실을 알 수 있다. 투과도와 더불어 투명 금속 전극의 중요한 성능요소인 면저항은 전극 증착을 통해서 측정을 하였다. 면저항 측정치를 보여주고 있는 Fig. 6(b)를 통해 전극의 금속 두께가

두꺼워질 수록 주기가 작아질수록 면저항이 작아져 전기 전도도가 좋아지는 경향을 확인할 수 있다. 가장 작은 주기 10 μm 의 경우 57 Ω/\square 의 면저항을 보이고 있고 이는 비교 대상으로 잡고 있는 상용 ITO glass (15~30 Ω/\square)에 대하여 저항 부분에서 조금은 그 성능이 떨어지지만 터치스크린과 같이 저항값에 관용도가 높은 응용처에는 충분히 경쟁력이 있는 값이다. 그리고 향후 물질과 공정 최적화를 통해 defect을 줄이고 금속 도선 자체의 저항을 줄인다면 상용 ITO에 상응하는 면저항 성능을 가질 수 있으리라 예상한다. 또한 필름 기판 위에도 제작이 가능하고 곱힘 하중에 대해서 표면 안정성이 있는 금속 전극이 ITO glass에 대해서 충분히 경쟁력이 있음을 확인할 수 있었다. 이에 롤타입의 위상 이동 리소그래피를 이용하여 제작한 투명 금속 전극이 충분히 기존에 사용하던 ITO glass를 대체할 수 있다는 가설의 타당성을 확인할 수 있었다.

2.4 롤 타입 포토리소그래피(roll type photolithography)

롤타입의 포토리소그래피는 앞서 소개한 위상 이동 리소그래피의 마스크를 금속 필름 마스크로 교체하여 공정을 진행한다. 실제로 이 방식은 현재 사용하고 있는 일반적인 포토리소그래피 공정을 롤투롤 공정으로 변환 시킨 공정으로 웨이퍼 로딩, 언로딩을 연속 기관의 이동으로 변화시킨 것 이외의 부분은 모두 포토리소그래피와 공정을 공유한다. 특히 완전한 연속 공정을 위해서 필요한 연속 PR 코팅 장치와 현상(Develop) 장치는 이번 연구에서는 생략하고 스펀코팅과 수동 Develop으로 대체 하였다. 필름형태의 마스크는 현재 인쇄를 통해서 제작되어 여러 분야에서 사용이 되고 있다. 하지만 이 필름마스크는 최대 10 μm 정도 까지 해상도가 보장이 되기 때문에 그보다 작은 패턴을 구현하기 위해서는 필름 형태의 금속 마스크를 제작할 필요가 있다. 마스크 용도

로 가장 널리 쓰이는 금속은 크롬(Cr)이지만 본 실험에서는 에칭을 포함한 제작의 편의성을 위해 알루미늄(Al)을 사용하였다. 알루미늄은 TMAH 성분이 있는 현상액(Developer)에 식각이 되는 특성이 있어서 금속 마스크 제작 시 패터닝과 식각을 동시에 진행할 수 있는 장점이 있다. 또한 크롬을 사용하였을 때 PET 위에서 증착면에 작은 크랙이 생기는 단점이 있어서 필름마스크에 적용하기에 한계가 있다. 알루미늄 필름 마스크는 기존에 사용되던 포토리소그래피나 Stepper를 이용한 패터닝을 활용한다. 실험을 통해 광원에서 나오는 자외선을 최대한 막아주면서 가장 얇은 효율적인 금속층의 두께를 구했고 그 결과인 50 nm 두께의 알루미늄을 PET 필름 위에 증착하였다. 그 후 PR 코팅, 노광, 현상 과정을 거쳐서 알루미늄 필름 마스크를 제작하였다. 알루미늄 층의 식각을 위해 현상은 사용한 PR의 일반적인 현상 시간보다 약 2분 더 진행하였다. 이렇게 제작된 필름형 금속마스크를 퀴츠 실린더에 감아서 롤타입의 포토마스크 제작을 완료하게 된다. Fig. 7은 롤타입 포토리소그래피의 개략도와 제작된 필름형태의 금속마스크, 최종 생산된 구조의 SEM 사진이 표시되어있다.

롤타입의 포토리소그래피는 연속 생산이 가능하다는 생산과정의 차이를 제외한 다른 기본 공정 원리를 기존의 포토리소그래피에서 가져왔기 때문에 공정과정은 물론이고 생산결과물고 거의 같다. 하지만 생산 구동 원리의 특성 때문에 기존의 포토리소그래피에서는 구현할 수 없었던 실시간 구조 주기 조절 기능이 있다. 롤포토 마스크와 기관을 1:1로 매칭시켜 공정을 진행하는 것이 아니라 기관의 이송속도와 롤 마스크의 회전속도를 제어하여 패턴의 주기를 조절할 수 있는 것이다. Fig. 8(a),(b)는 각각 롤마스크의 빠른 회전, 기관과 1:1매치가 되는 속도의 회전, 느린 속도의 회전에 대한

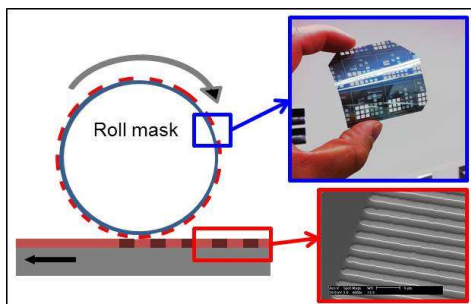


Fig. 7 Scheme of roll type photolithography and images of mask and fabricated pattern

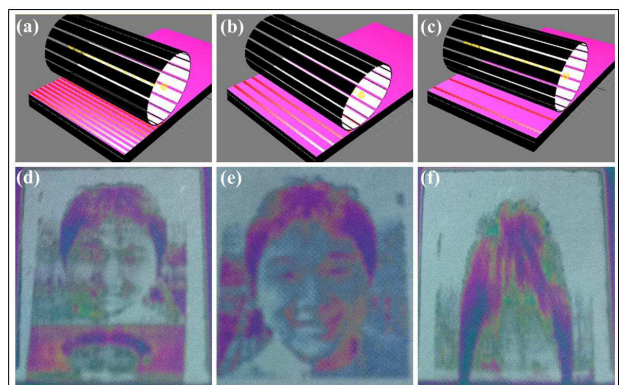


Fig. 8 Period control technique and test samples

결과 패턴의 주기 변화를 나타낸 그림이다. 이때 기관의 이동 속도는 세 경우에서 동일하다. 롤 마스크 회전 속도를 조절하여 주기 조절을 위해서는 마스크와 기관의 PR 코팅면이 접촉되어 있지 않아야 한다. 그 결과 빠른 롤 마스크 회전의 경우에는 기관의 단위이동당 노광의 빈도가 높아지게 되어 결과 패턴이 접촉형태로 마스크와 기관이 1:1 매칭이 되었을 때 보다 밀집된 형태로 나타난다. 반대로 느린 속도의 롤 마스크 회전의 결과로는 마스크패턴의 주기보다 넓은 주기의 패턴이 형성 된다. 이러한 생산 특성을 테스트 하기 위해서 이미지를 롤 마스크로 만들어 주기 조절 실험을 하였다. Fig. 8(d), (e), (f)는 실제 테스트를 한 결과 이미지로 노광 후 PR 현상을 한 기관의 사진이다. 회전 속도가 빠른 경우는 패턴간의 주기가 마스크보다 작아지면서 사진이 길이방향으로 압축이 되었고 반대의 경우에는 길이 방향으로 길어진 결과를 볼 수 있었다. Fig. 8(d), (f)의 기준 이미지는 롤 마스크와 기관이 1:1 매칭을 보일 때의 이미지인 Fig. 8(e) 이다. 이를 이용해서 하나의 마스크로 주기를 실시간으로 조절 가능한 공정을 확보 할 수 있다.

2.5 롤 타입 포토리소그래피의 응용

앞서 2.3 에서 보았던 롤타입 위상 이동 리소그래피의 응용과 마찬가지로 롤타입 포토리소그래피를 이용해서 투명 금속 전극을 제작해 보았다. 아래 Fig. 9 에서 보는 것과 같이 10, 30, 50, 70 μm 주기를 갖는 폭 1 μm , 두께 60 nm 의 알루미늄 그물 구조를 제작하였다. 큰 결함 부분 없이 100 mm^2 면적에 패터닝이 잘 되었고 금속층의 에칭 역시 현상액(MF-319, Shipley)을 사용하여 현상과 동시에 진행하였다.

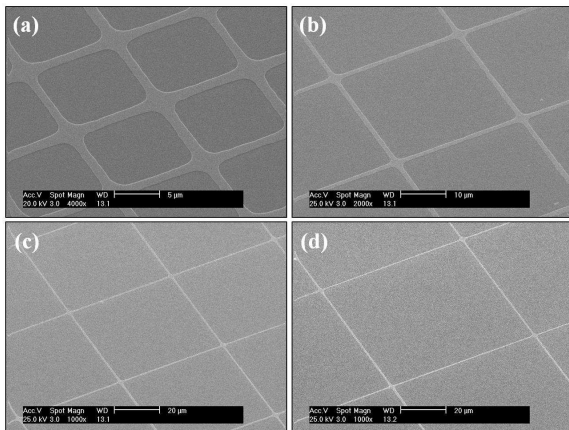


Fig. 9 SEM images of TME. Metal line widths of all samples are 1 μm . Periods of (a~d) are 10, 30, 50, 70 μm , respectively. Thickness of all samples is 60 nm

이 방식으로 제작된 투명 전극에 대해서도 역시 투과도와 면저항을 측정하였다. Fig. 10 은 두께가 60 nm로 고정되어있는 네 가지 주기에 대한 투명 전극에 대한 투과도를 측정한 결과이다. 10 μm 주기의 샘플(75%)을 제외하고 나머지 세 가지의 샘플은 모두 90~95% 에 이르는 투과도를 보였다. 금속 선폭이 대략 1 μm 이므로 Fig. 9(a), (b), (c), (d)의 opening area는 각각 90, 96, 98, 98.5 % 이다. 교차점에서의 라운딩과 몇몇 결점 때문에 실제 투과도는 그보다 낮게 측정이 되었다. 또한 실제 금속 선폭의 경우 좁은 주기보다 넓은 주기의 샘플에서 얇게 나타났는데 이는 구조의 밀도가 낮아서 노광과 에칭 효율이 높기 때문으로 판단 된다. 그 결과 좁은 주기의 패턴(Fig. 9(a))에서는 더욱 계산값보다 낮은 투과도를 보이고 넓은 주기의 패턴에서는 계산값과 거의 일치하는 값을 보이게 된다. 이 샘플들의 면저항 역시 옴의 법칙으로 계산되었고 동시에 전극 증착 후 측정되었다.(테이블 1) 알루미늄 전극의 산화와 웨트칭의 불균일성 등의 이유로 계산값보다 측정값이 높게 나왔지만 타당한 수준의 결과값이 측정되었다. 85%의 투과도와 최소 20 Ω/\square 의 면저항을 가지고 있는 ITO glass와 비교했을때 30 μm 주기를 갖는 두께 60 nm의 금속 투명 전극은 투과도 90%, 저항 21.11 Ω/\square 을 보여 주며 굽힘 안정성과 제작의 용이성 등을 토대로 향후 ITO glass를 대체 할 수 있는 가능성을 보여 주었다.

Table 1 Measured and Calculated sheet resistance of TME samples with 60 nm thickness

	Measured	Calculated
10 μm period	10.5	4.45
30 μm period	21.11	13.36
50 μm period	48.3	22.27
70 μm period	80.01	31.18

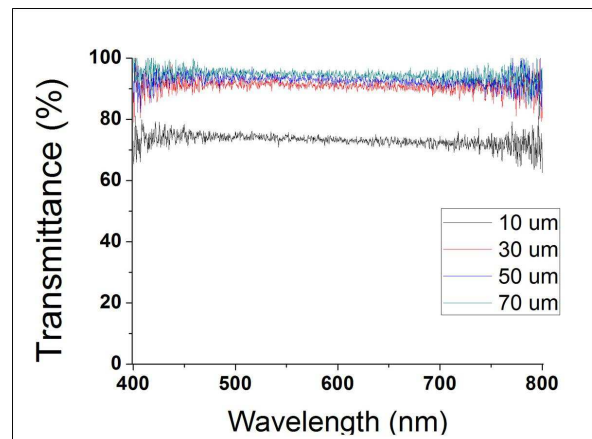


Fig. 10 Transmittance of TME fabricated by PRL

3. 결 론

참고문헌

이 연구를 통하여 연속적으로 구조를 생산 할 수 있는 포토리소그래피 공정을 한계 해상도에 따라 위상이동 리소그래피와 포토리소그래피로 나누어 소개하였다. 웨이퍼 기반의 생산을 벗어난 연속 생산 공정과 잔존층이 없는 미세 구조 제작 그리고 실시간 주기 조절 공정 등의 생산 공정상의 특징은 기존의 포토리소그래피와 롤타입의 나노임프린팅의 한계를 잘 극복한 점이다. 이러한 대면적의 패턴 형성 기술은 여러 소자를 만드는데 있어서 매력적인 방법이 될 것이고 실제 그 예로 투명 전극을 제작하여 응용의 가능성을 가늠하였다. 이렇게 제작된 투명전극은 현재 디스플레이와 태양전지 등의 연구에서 사용되고 있는 ITO 기판을 대체할 수 있을 만한 성능을 보여줌으로써 이 기술의 학문적, 산업적 중요성을 확인시켜 주었다. 이 새로운 기술은 미세구조의 대량생산에 있어 매우 효율적인 방법이 될 것이다.

후 기

이 논문은 2012 학년도 경북대학교 신입교수정착연구비에 의하여 연구되었음. 연구에 대한 조언을 해주신 미국 미시간 대학교의 L. Jay Guo 교수님께 감사 드립니다.

- (1) Kwak, M. K., Kim, T.-i., Kim, P., Lee, H. H. and Suh, K. Y., 2009, "Large-Area Dual-Scale Metal Transfer by Adhesive Force," *Small*, Vol. 5, p. 928.
- (2) Ahn, S. H., Kim, J. and Guo, L. J., 2007, "Bilayer Metal Wire-Grid Polarizer Fabricated by Roll-to-Roll Nanoimprint Lithography on Flexible Plastic Substrate," *J. Vac. Sci. & Technol. B*, Vol. 25, No.6, pp.2388~2391.
- (3) Ahn, S. H. and Guo, L. J., 2008, "High Speed Roll-to-Roll Nanoimprint Lithography on Flexible Plastic Substrate," *Adv. Mater.*, Vol. 20, pp.2044~2049.
- (4) Kwak, M. K., Shin, K. H., Yoon, E. Y. and Suh, K. Y., 2010, "Fabrication of Conductive Metal Lines by Plate-to-Roll Pattern Transfer Utilizing Edge Dewetting and Flexographic Printing," *J. Colloid Interface Sci.* Vol. 343, p. 301.
- (5) Choi, M.-C., Kim, Y. and Ha, C.-S., 2008, "Polymers for Flexible Displays: From Material Selection to Device Applications," *Prog. Polym. Sci.*, Vol. 33, p. 581.
- (6) Rogers, J. A., Paul, K. E., Jackman, R. J. and Whitesides, G. M., 1997, "Using an Elastomeric Phase Mask for Sub-100 nm Photolithography in the Optical Near Field" *App. Phys. Lett.* Vol. 70, p. 2658.
- (7) Choi, S.-J., Kim, H. N., Bae, W. G. and Suh, K.-Y., 2011, "Modulus- and Surface Energy-Tunable Ultraviolet-Curable Polyurethane Acrylate: Properties and Applications," *J. Mater. Chem.*, Vol. 21, No. 38, p.14325.