

Roll-to-Roll UV 나노 임프린팅 리소그래피에 의한 대면적 17인치의 나노 와이어 그리드의 제작

허종욱,[†] 남수용

[†]미라나노텍(주), 부경대학교 공과대학 인쇄정보공학과

(2011년 10월 4일 접수, 2011년 11월 7일 최종 수정본 접수, 2011년 11월 18일 게재 확정)

Fabrication of a 17inch Area Size Nano-Wire Grid using Roll-to-Roll UV Nano-Imprinting Lithography

Jong-Wook Huh,[†] Su-Yong Nam

[†]Miraenanotech. Co., Ltd,

Dept. of Graphic Arts Information Engineering, Pukyong National University

(Accepted on October 4, 2011, Requisitioned last revision on November 7, 2011,

Publication decision on November 18, 2011)

Abstract

The polarizer is an important optical element used in a variety of applications. Nano-wire grid polarizers in the form of sub-wavelength metallic gratings are an attractive alternative to conventional polarizers, because they provide high extinction ratio. This study has been carried out to fabrication of the 17inch area size nano-wire grid polarizer(NWGP) The master for NWGPs with a pitch of 200nm and the area size 730mm x450mm were fabricated using laser interference lithography and aluminum sputtering and wet etching. And The NWGP fabrication process was using by the Roll to-Roll UV imprinting and was applied to flexible PET film.

The results were a transmission of light (Tp) 46.7%, reflectance (Rs) 40.1% and Extinction ratio of above 16 for the visible light range.

Key-word: Nano-wire grid polarizers, 17inch, PET film, Roll to-Roll UV imprinting lithography.

1. 서 론

나노 와이어 그리드 편광자(NWGP, nano-wire grid polarizer) 필름은 표면에 나노 메탈 격자(grating) 구조를 가진 광학 부품으로 편광 효율이 좋고, 광시야 각, 장기 신뢰성이 뛰어난 장점을 가지고 있다. 현재 유리 기관상에 75nm, 100nm 피치의 NWGP는 상용화 되어있지만, 면적 사이즈가 7인치 이하로서, 디스플레이 등의 분야에 응용하기가 어렵다. 즉, 가격이 싸고, flexible하며, 대면적이 가능해야 한다. 이를 위한 가장 유력한 기술이 Roll-to-Roll 임프린팅(imprinting) 기술이다.^{1~12)}

메탈 나노 와이어 그리드의 제조에 있어서 Roll-to-Roll 임프린팅은 미국 Michigan 대학에서 (Se-Hyun Ahn, L. Jay Guo) 플라스틱 기재상에 70nm 선 넓이(line-width) 격자(grating) 공정 기술을 소개한 보고가 있다. 그리드의 피치, 높이, 메탈의 두께 등을 최적화를 통하면 좋은 편광 성능을 확보할 수 있다는 견해를 밝히고 있다. 그러나 이 기술의 개념은 뛰어 나지만 전 공정을 인라인(in-line)화는 실제 적용에 있어서는 많은 어려움이 있을 것으로 예상된다. LG 전자(Jin-Sung Kim 등, 2004년)에서 나노 와이어 편광을 glass 기관위에 나노 임프린팅 리소그래피 공정으로 200nm급으로 제작한 보고가 있다.

먼저 glass 기관위에 알루미늄을 150nm 두께로 증착한 뒤 레지스트, mri-8020 (Microresist Technology Company)을 약 200nm 두께로 스핀코팅한 뒤 140도에서 baking 한 다음, 135도 가온한 뒤 SiO₂ 스탬프를 이용, 45 bar에서 180초 동안 가압한다. 이후 공기 중에서 90도 정도 냉각한 뒤 몰드를 분리한다. 이때 임프린팅된 패턴의 높이는 160nm, 폭은 150nm이었다. 여기서 기저층의 두께를 최소화 하는 것이 중요한데, 약 50nm 정도이었으며, 이것은 O₂ RIE 에칭으로 제거한 다음, 알루미늄 에칭을 실시하여 최종적으로 나노 와이어 편광을 만들었다. 이 NWGP의 dimension은 피치 200nm, 선 넓이 150nm, 높이 150nm이었으며, 크기는 3cm x 3cm이었다.¹³⁾

LG 전자(Sang-Hoon Kim 등, 2006년)는 알루미늄 경사 증착(Al oblique deposition)법으로 200nm 피치의 NWGP를 제작하였으며, 이때 Tp 90%, 콘트라스트율(contrast ratio)은 12.5이었고, LCD BLU 휘도 상승률은 1.30배를 얻었다는 보고가 있다.¹⁴⁾

본 연구의 나노 와이어 그리드의 임프린팅은 Figure 1과 같이 Roll-to-Roll UV 나노 임프린팅 공법으로 UV 경화형 수지를 사용함과 동시에 임프린팅은 상온, 상압에서 이루어진다. 나노 임프린트용 수지는 저점도를 유지하면서 PET 등 기재와의 부착력, 패턴의 전사성(fidelity), 몰드와의 이형성 등이 요구되며, 대형 나노 와이어 그리드 마스터는 레

이러한 간섭(laser interference) 리소그래피에 의해 제작되었으며, 임프린팅 시에는 마스터로부터 소프트 몰드를 제작하여 사용하였다. 기저층(residual layer)두께의 균일도는 금속 증착 시 금속층의 두께를 균일하게 일어나지 못하게 하며 나아가 에칭 공정 진행시 에칭이 선택적으로 일어나지 못하게 하는 영향을 미친다. 메탈 나노 와이어 그리드의 형성은 증착에 의한 알루미늄을 박막층을 습식 에칭으로 격자를 제작하였으며, 표면 보호를 위해 박막의 금속층을 제공하였다.

2. 실험

2-1. Roll-to-Roll UV 나노 임프린팅 장치

Roll-to-Roll UV 나노 임프린팅 장치는 Figure 1과 같이 연속 작업이 가능하도록 unwinder와 winder를 갖추고 있으며 특히 가압 롤의(130c) 두께 균일도, 롤에 가해지는 압력, Roll-to-Roll 장비에 걸린 몰드의 텐션에 영향을 받는다. 롤의 두께 균일도가 5%를 벗어나는 경우, Press Roll에 가해지는 압력이 100kpa에 미치지 못하는 경우, 소프트 몰드에 걸린 텐션이 50kpa 이하인 경우에 Roll-to-Roll 임프린팅 제품의 기저층 두께 편차가 10%를 넘어서게 되고 이런 경우 후속 공정인 알루미늄 금속 층의 에칭이 선택적으로 이루어 지지 않게 된다.

UV 경화 조건의 최적화가 중요한데, 이는 자외선의 광도, 광량 등이 적절하지 않으면 패터닝 시에 수축이 과다하게 발생한다. 대개 수지의 formulation에 따라 달라지기는 하지만 약 $1000\text{mJ}/\text{cm}^2$ 의 광량이 필요하고, 이때 램프는 고압 수은 램프를 사용한다.

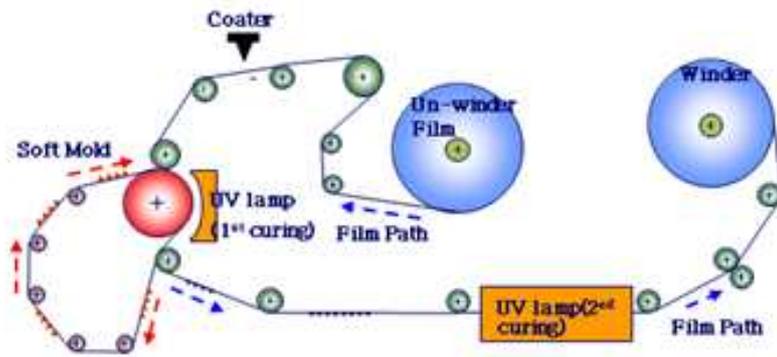


Figure 1. A schematic photograph of the R2R UV imprinting processing for nano wire grid film.

또한 UV의 경화 후, 몰드와의 이형 등 제반 조건이 충분하지 않으면, 나노 와이어의 패턴의 전사가 제대로 이루어 지지 않아 패턴의 형상이 제대로 형성되지 않고, 금속 증착 공정에서 균일한 증착이 이루어 않게 결국 습식 에칭 시에 표면 불량으로 나타난다.

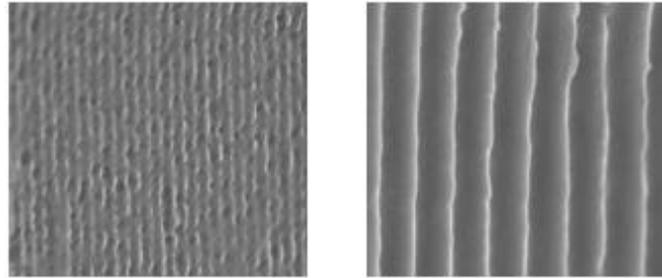


Figure 2. A SEM photograph of Roll-to-Roll imprinted NWGP at the linear speed 2m/min.

Roll-to-Roll 임프린팅 공정 중 몰드에서 나노 와이어의 패턴이 이형 될 때의 Roll의 각도가 40도를 넘을 경우, 나노와이어 그리드의 패턴이 Figure 3과 같이 부러지거나 꺾이는 결과가 나타난다.

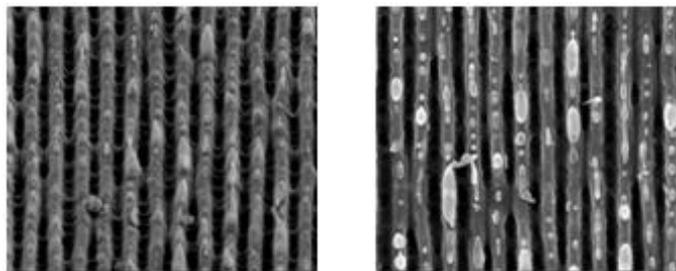


Figure 3. A SEM photograph of R2R imprinting, over 40 degree of angle of releasing.

200nm Line/Space grating mold을 이용하여 이형성 테스트를 urethane 타입의 수지를 사용하여 mold와의 이형성을 평가하였으나 Figure 3과 같이 임프린팅 후, 패턴의 형상은 좋지 않은 것으로 관찰된다. 이는 수지와 substrate의 적합성이 좋지 않은 것으로 판단된다. 임프린팅 공정 조건에 따라서 완전히 이형이 되지 않아 패턴이 끊어지는 현상을 보이는 것이 있는가 하면, 넘치게 이형이 되었거나, 패턴 사이의 형상이 불명확하게 나타나는 것도 관찰되어 나노 임프린팅의 공정은 수지, 기재, 공정 등의 최적의 조건이 갖추어져야 좋은 패터닝 결과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

2-2. 나노 와이어 그리드 마스터의 제작

나노 와이어 그리드 편광 필름의 구조는 Figure 4와 같이 Line/Space 격자 형태로서 피치 200nm, 알루미늄의 높이 112nm, 넓이 70nm으로 설계하였으며, 나노 와이어 그리드 마스터는 레이저 간섭 리소그래피에 32인치 크기로(730mm×450mm) 제작(Holotools, Germany) 하였으며, 피치는 200nm, 높이 250nm, 넓이 100nm의 Line/Space의 격자 구조로 되어있다

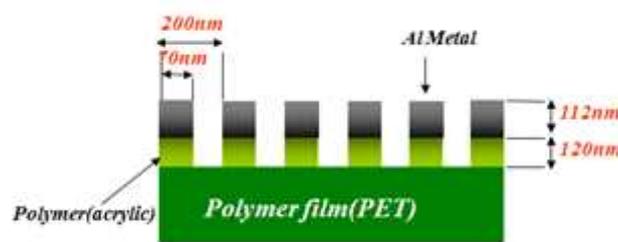


Figure 4. A schematic structure of NWGP.

기존의 자외선을 광원으로 반도체 공정은 수 백 나노미터 대역의 파장으로 인해 해상도가 수 마이크로 정도로 나노구조를 제작하기에는 적합하지 않다. ArF 레이저($\lambda=193$ nm)와 위상 천이 마스크 등을 활용한 100nm 급 구조를 리소그래피 공정으로 제작할 수 있다. 그러나 이것은 대면적의 제작에 적합하지 않고 또한 고가의 장비를 활용해야 하는 단점을 지니고 있다. 또 다른 방식으로 전자빔(E-beam) 리소그래피를 광원으로 활용할 경우 고해상의 구조를 제작할 수 있으나 이 역시 대면적의 제작에는 많은 시간과 고가의 장비를 사용해야 하는 단점을 지니고 있다. 현재 나노 와이어 그리드용 마스터를 만들 수 있는 기술은 전자빔 리소그래피가 주로 사용되고 있으나, 기술의 특성상 10인치 면적 이상은 현실적으로 많은 어려움이 있어 불가능에 가까운 실정이다. 특히 LCD 용으로 사용될 수 있는 대형 사이즈의 나노 와이어 그리드 편광 필름을 제작하기 위해서는 대면적 크기의 격자 패턴 마스터의 제조, 상용화가 가능한 기술로는 레이저 등의 간섭 노광을 이용하는 레이저 간섭 리소그래피 기술이 소개되고 있다.

이 기술은 빛의 간섭 현상을 이용하는 방식으로 대면적 나노 격자 제조에 유리하다. 이것은 두 개의 코히런트 광에 의해 간섭 패턴을 만들고 이것을 포토레지스트와 같은 감광성 필름에 노광한 후, 화학적 처리를 통해 나노 패턴을 만드는 기술이다. 장점은 마스크 없이 나노 구조물을 리소그래피 방식으로 만들며, 간섭 파장과 입사 각도를 조절함으로써 여러 가지 간격을 갖는 패턴을 만들 수 있지만 주기적인 구조물만 만들 수 있다는 단점을 가지고 있다.

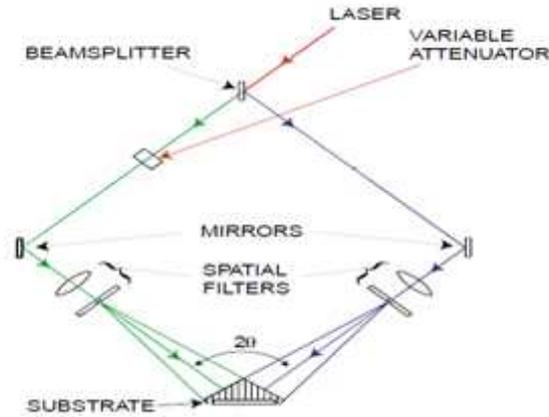


Figure 5. A schematic illustration for making nano wire grid pattern by interference lithography.

2-3. UV 나노 임프린팅용 폴리머(polymer)

UV 나노 임프린팅용 폴리머 수지는 부착력, 전사성, 물리적 특성 그리고 경화 속도가 빠른 특성을 가져야 한다. 그래서 NWGP을 제작하기 위한 나노 임프린팅 수지는 Oligomer는 Fluorine type을 사용했으며, 모노머(monomer)는 2-HEA(2-Hydroxyethyl Acrylate), TMPTA(Trimethylol Propane Triacrylate), DPEHA(Dipentaerythritol Hexaacrylate), TPGDA(Tripropylene Glycol Diacrylate), NVP(N-Vinyl-2-Pyrrolidone) 등과 광 개시제는 DMPA(Dimethoxy Phenyl Acetophenone)을 formulation하여 사용했으며, 점도는 100cps이었다.

나노 임프린팅에 있어서 특히 중요한 패턴 전사성(pattern fidelity)은 초기에는 30%에 불과 하였으나 수지의 formulation, 공정 조건의 개선 등으로 거의 85% 수준에 이르게 되었다. 즉, 나노 와이어 패턴인 Lind/Space의 높이는 약 120nm까지 얻을 수 있었다. 이때의 점도(viscosity)는 20~300cps이었다.

메탈 나노 와이어 그리드 편광 필름의 기재로서는 PET 필름 250um(SKC)을 사용하였다.

2-4. 측정

2-4-1. 광 투과율과 반사율의 측정

메탈 나노 와이어 그리드 편광 필름의 광 투과율과 반사율의 측정을 위해 Varian 사의 UV-Vis spectrophotometer(model no. 5000)를 사용하였다.

2-4-2. 나노 와이어의 형상 측정

나노 와이어 그리드의 형상을 측정하기 위해 FEI사의 FIB(Focused Ion Beam) SEM(model no. NOVA 200)를 사용하였다.

2-4-3. NWGP의 extinction을 평가

NWGP 필름의 콘트라스트를 평가하기 위해 BLU 시트 구성을 ESR(반사 필름)+RTDC(확산 필름)+Cross BEF(3M)+NWGP 으로 하였고, 테스트 모듈은 mobile 3.5"(삼성 전자)를 사용하여 반사형 편광 필름인 NWGP와 DBEF의 각각의 편광 성능을 가늠하기 위해서 ELDIM사의 EZContrast(model no.; XL88W)를 사용하여 extinction을 측정하였다.

3. 결론

3-1. R2R UV 임프린팅 공정에 의한 나노 와이어 그리드 패턴의 형성

Mold는 soft mold를 600mm직경의 드럼에 감아서 부착한 뒤, UV 경화용 수지를 코팅하고 상온에서 임프린팅한 뒤 곧바로 1차 UV 경화(pre-curing condition; 100mJ/cm²)를 실시한 다음, mold와 이형시키고 나서 2차 UV 경화(post curing condition; 1,000mJ/cm²)를 하고 난 뒤, winding함으로서 패터닝이 이루어지게 된다. linear speed는 3m/min으로 하였고 임프린팅 후, 이형하고 난 뒤의 기저층(residual layer)은 약 10um을 나타내었다.

그러나 나노 와이어 그리드 편광 필름의 특성을 결정 지우는 것은 P 편광의 투과율인데, 이 기저층의 두께는 투과율에 영향을 주지 않으므로 무시하였다. 임프린팅 후, 나노 와이어의 두께는 110~120nm를 유지하였고, 이때 패턴 전사율은 약 85%를 나타내었다.

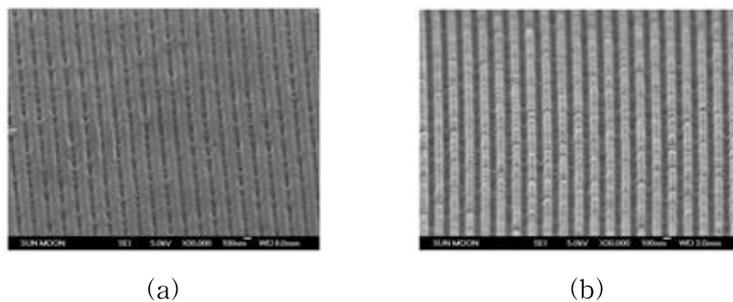


Figure 6. FIB SEM photograph of NWGP in the UV nano-Imprinting processing for (a) soft mold, (b) nano-wire grid film after imprinting.

3-2. 메탈 나노 와이어 그리드 편광자의 제작

메탈 나노 와이어 그리드 편광자의 제작 공정은 Figure 7과 같이 기재 PET 필름 상에 UV 경화형 폴리머를 임프린팅하여 그리드 패턴을 형성한 다음, 그 위에 증착에 의해 박막의 알루미늄층을 형성하고 다시 습식 에칭으로 메탈 격자를 형성한다. 이때 메탈 나노 와이어의 표면 강도를 보강하기 위해 투명한 금속으로 top층을 제공함으로써 나노 와이어 그리드 편광자의 제작이 완료된다.

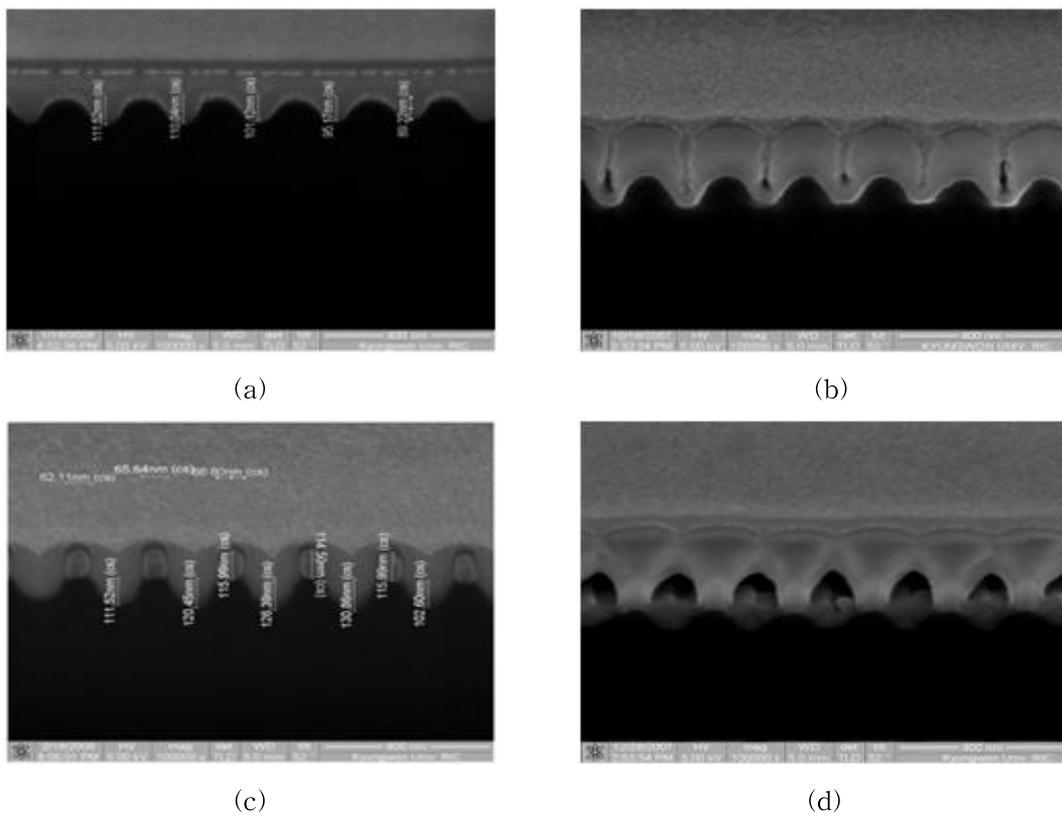


Figure 7. (a) Polymer layer pattern produced by nano imprinting, (b) Aluminum deposited, (c) Aluminum grating with a 200nm pitch after wet etching, (d) NWGP with a SiO₂ top layer

3-2-1. 알루미늄의 증착(Al deposition)

나노 와이어 패턴으로 형성된 폴리머 수지층위에 금속인 알루미늄을 증착 방법으로 박막 코팅층을 형성하게 된다. 이때 수지층과 알루미늄층 사이의 밀착력을 올리기 위하여 전처리가 매우 중요하다. 전처리는 산소 이온 빔(O₂, 18 SCCMx3min) 가스를 사용했

으며, 또한 E-beam evaporator를 이용하여 휘도 등 광학적 특성, 물리적 특성, 특히 외관 개선을 위해 bottom층을 제공하게 되는데, 이 때 사용하는 재료 물질은 SiO₂를 사용했으며, 코팅 방식은 증착으로 하는데, SiO₂ 코팅 두께는 300Å으로 하였다. bottom층을 형성한 결과 휘도가 약 5% 증가되었고, 외관 및 취급성이 향상되었다. 증착 공정 조건은 진공도 2.0x 10⁻⁵torr, power는 40Å/sec를 적용하였으며, option으로 IBAD(Ion Beam Assist Deposition)을 사용했다.

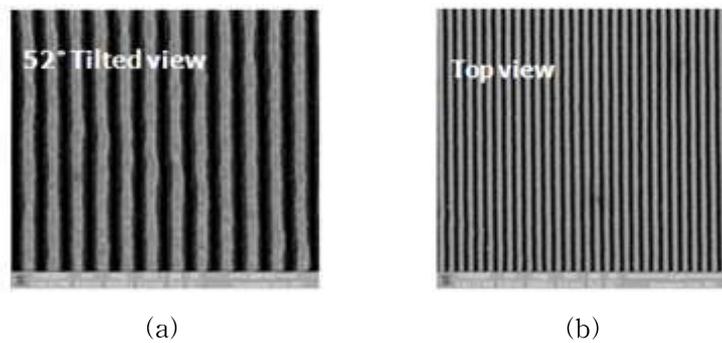


Figure 8. FIB SEM photograph of (a) 52° tilted view (b) top view of the NWGP after Aluminum deposition.

알루미늄 박막 증착의 전처리 조건은 Ion beam treatment는 Ar gas, 14 SCCM, 2,500V로 하였으며, cathode multi-system을 적용하여 진공도 10⁻⁴torr에서 실시하였다. 알루미늄의 증착 두께는 2,000Å으로 하였으며, 수지와의 밀착력, 막질 등의 변화를 관찰하여 알루미늄의 그리드 형성을 위하여 습식 에칭에 의한 패터닝에 유리한 조건을 선정하였다.

3-2-2. 알루미늄의 습식 에칭

메탈 층의 그리드 형성은 먼저 기재 위에 전면적으로 알루미늄 메탈 층을 형성한 뒤 습식 에칭으로 선택적으로 메탈을 제거함으로써 이루어진다.

알루미늄의 에칭을 위한 에찬트는 질산+불화 암모늄 base의 농도 30%를 사용하였고, 속도를 5cm/min으로 하여 에칭에 따른 스크래치(scratch) 발생 억제 등 균일한 에칭을 통해 부식의 균일성 확보와 under-cut 최소화를 통해 폭 62~65nm, 높이 115nm으로 균일한 알루미늄 Rib의 형상을 얻었다.

3-2-3. NWGP의 표면 보호 처리

NWGP 의 나노 와이어 그리드는 알루미늄 메탈로 표면층을 약 100 나노미터 이하의 박막의 구조물이 세워져있는 형태여서 일반적인 LCD용 광학 필름으로 사용하기에는 표면의 내구성, 즉 내스크래치성(anti-scratch), 취급성 등이 취약하므로 이를 개선하기 위한 방안으로 금속의 나노 박막의 표면 보호층(top layer)을 제공한다. 그러나 이때 광투과 등 광학적 특성을 저해하지 않고 동시에 표면의 내구성을 확보하는 것이 매우 중요하므로 코팅하는 박막 물질의 선정 및 pores한 막질의 나노 표면층의 형성기술이 필요하다.

금속 코팅 물질은 SiO₂을 사용하였고, 코팅의 두께는 2,500Å으로 하였다. 내스크래치 정도 테스트 결과 연필 정도 3B(약 160gr)로 기존의 광학 필름과 유사한 성능을 나타냈고, 휘도는 코팅 전후를 비교하였을 때, 동등한 수준을 보였다. 이때 코팅 방식은 E-beam evaporator를 사용하였으며, power는 40Å/sec으로 하였다. 상기와 같은 과정을 거쳐 Figure 9와 같이 알루미늄 나노 와이어의 그리드의 폭 71nm, 높이 112nm, 피치 200nm, 기제는 250um 두께의 PET을 사용하여 나노 와이어 그리드 편광 필름을 제작하였다.

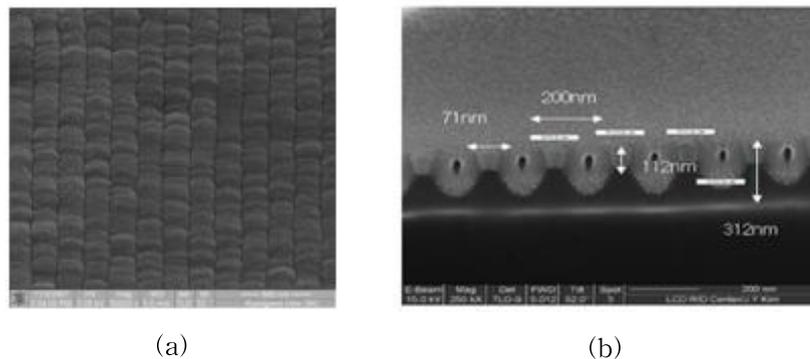


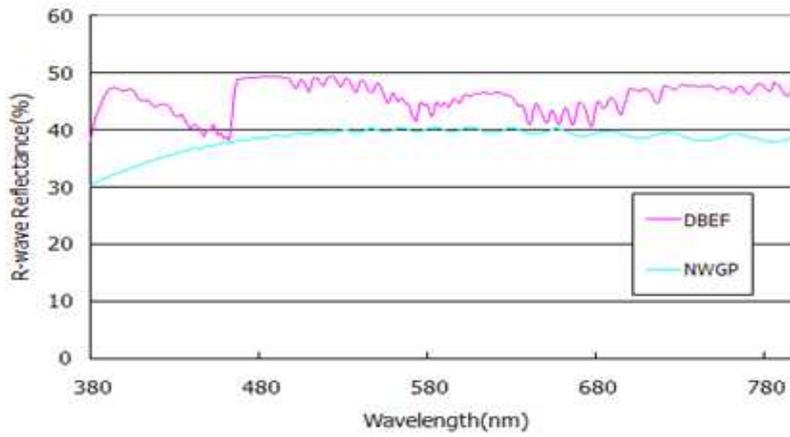
Figure 9. A FIB SEM photograph of (a) 52° tilted top view (b) cross section view of the NWGP.

3-2-4. NWGP 필름의 투과도 평가

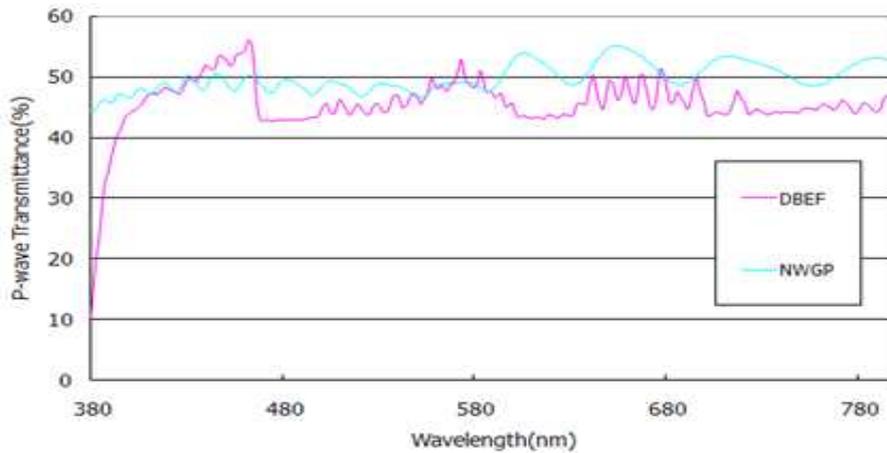
NWGP 필름의 투과도(transmittance ratio)는 Figure 10과 같이 550nm 파장 영역에서의 Tp는 46.7%, 반사율 Rs는 40.1%를 나타낸 반면, DBEF는 Tp 46.8%, Rs 48.2%를 나타내고 있다(Tp+Rs =100).

이들 두 필름을 비교해 보면 NWGP 필름은 Tp는 DBEF 거의 유사한 경향을 나타내는데, 이는 200nm 피치의 알루미늄 나노 와이어 그리드의 편광 필름이 P 편광의 투과율은 우수하다는 것을 보여주나, 반면 반사율 Rs에서 약 8%정도 DBEF 대비 떨어짐을 알

수 있다. 이것은 NWGP에 사용되는 금속 물질인 알루미늄의 반사율이 최대 90%에 불과한데서 원인을 찾을 수 있다. 즉 NWGP의 휘도 향상 효과를 DBEF 과 동등한 수준을 갖기 위해서는 Rs값을 올려야 하고, 이를 위해서는 알루미늄 보다 높은 거의 100%에 가까운 반사율 특성을 갖는 물질을 사용하거나 아니면 구조적으로 Rs값을 최대로 끌어 올리는 수단이 필요하다는 이슈를 남기고 있다.



(a)



(b)

Figure 10 Experimental results for (a) P-wave transmittance ratio and (b) R-wave reflectance ratio for NWGP and DBEF in wave-length range of 380nm~780nm.

3-2-5. NWGP 필름의 extinction을 평가

NWGP 필름의 extinction을 측정 결과는 Figure 11~12와 같이 on-axis에서 16:1로 나타났다. 이는 메탈 나노 와이어 구조의 형태가 다층 구조에 비해 편광도가 높다는 것을 시사하는 것으로 향후 메탈 나노 와이어 구조의 편광 필름이 LCD 패널의 편광판을 대체할 수 있는 가능성도 제시하고 있다.

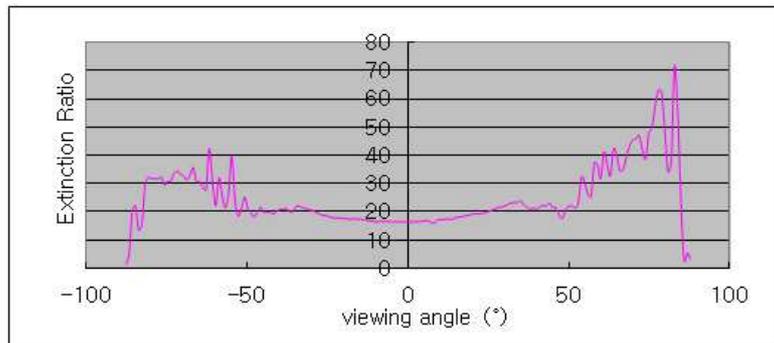


Figure 11. The angular distribution of the extinction ratio of the NWGP.

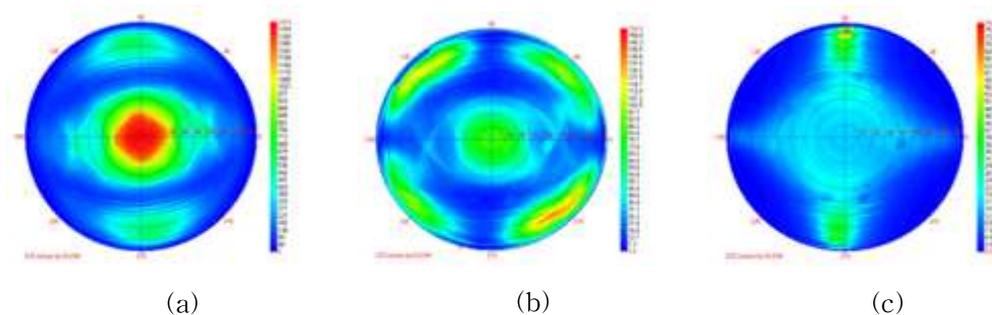


Figure 12. Extinction ratio of NWGP at (a) on-state, (b) off-state, (c) extinction ratio.

4. 결 론

면적 17인치 크기의 NWGP 필름을 Roll-to-Roll 임프린팅 공정으로 제작하였으며, 나노 와이어 그리드의 마스터는 레이저 간섭 리소그래피로 제작하였으며, 이 NWGP는 P 편광의 투과도 T_p 는 550nm 파장 영역에서 46.7%, R 편광의 반사율 R_s 는 40.1%를 나타냈으며, extinction을 측정 결과는 16:1로 나타났다. 이는 메탈 나노 와이어 구조의 형태

가 향후 메탈 나노 와이어 구조의 편광 필름이 LCD 패널의 편광판을 대체할 수 있는 가능성도 제시하고 있으며, 또한 반사형 편광 필름으로 충분히 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

- (1) Lei Chen, Jian Wang, Frank Walters, Xuegong Deng, Mike Buonanno, Stephen Tai, and Xiaoming Liu, "58 nm half-pitch plastic wire-grid polarizer by nanoimprint lithography", *Journal of Vac. Sci. Technol. B*, Vol. **25**, No. 6, pp. 2654~2657(2007).
- (2) Jin-Sung Kim, Ki-Dong Lee, Seh-Won Ahn, Sang Hoon Kim, Joo-Do Park, Sung-Eun Lee, and Sang-Soo Yoon, "Fabrication of Nanowire Polarizer by Using nanoimprint Lithography", *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. **45**, s890~s892(2004).
- (3) M. Xu^{1,2}, H.P. Urbach^{1,2}, D.K.G de Boer¹, and H.J. Cornelissen¹, "Wire-grid diffraction gratings used as polarizing beam splitter for visible light and applied in liquid crystal on silicon", *Optics Express*, Vol. **13**, No. 7(2005).
- (4) Se-Hyun Ahn, Jin-Sung Kim and L. Jay Guo, "Bilayer metal wire-grid polarizer fabricated by roll-to-roll nano-imprint lithography on flexible plastic substrate", *Journal of Vac. Sci. Technol. B*, Vol. **25**, No. 6, pp. 2388~2391(2007).
- (5) Zhibing Ge and Shin-Tson Wua, "Nanowire grid polarizer for energy efficient and wide-view liquid crystal displays", *APPLIED PHYSICS LETTERS*, 93, 121104(2008).
- (6) Jian Jim Wang, Lei Chen, Xiaoming Liu, Paul Sciortino, Feng Liu, Frank Walters, and Xuegong Deng, "30-nm-wide aluminum nanowire grid for ultrahigh contrast and transmittance polarizers made by UV nanoimprint lithography", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. **89**, 141105(2006).
- (7) T. Miyazaki, K. Hayashi, Y. Kuba, and H. Ohyi, T. Obara, O. Mizuta, N. Murayama, H. Tanaka, Y. Kawamura, and H. Uemoto, "Potential of a rotary stage electron beam mastering system for fabricating patterned magnetic media", *Journal of Vac. Sci. Technol. B*, Vol. **26**, No. 6, pp. 2611~2618(2008).
- (8) Zhibing Ge, Xinyu Zhu, and Shin-Tson Wu, "A transfective Liquid Crystal

- Display Using an Internal Wire Grid Polarizer", *Journal of Display Technology*, Vol. **2**, No. 2, pp. 102~105(2006).
- (9) Zhaoning Yu, Paru Deshpande, Wei Wu, Jian Wang, and Stephen Y. Chou, "Reflective polarizer based on a stacked double-layer subwavelength metal grating structure fabricated using nanoimprint lithography", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. **77**, No. 7, pp. 927~929(2000).
- (10) Stephen Y. Chou and Wenyong Deng, "Subwavelength amorphous silicon transmission gratings and applications in polarizers and waveplates", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. **67**, No. 6, pp. 742~744(1995).
- (11) S. H. Hong, B. J. BAE, S. U. Kwak, H. Lee, "Fabrication of High Ordered nano-sphere Array on Curved Substrate by Nanoimprint Lithography", *J. Kor. Inst. Surf. Eng.*, Vol. **41**, No. 6(2008).
- (12) X. J. Yu and H. S. Kwok, "Optical wire-grid polarizers at oblique angles of incidence", *Journal of Applied Physics*, Vol. **93**, No. 8, (2003)[39] 대한민국 특허청(KR), 공개특허공보(A), 공개번호 10-2005-0037773(2005).
- (13) Seh-Won Ahn, Ki-dong Lee, Jin-Sung Kim, Sang-Hoon Kim, Joo-Do Park, Sang-Hoon Lee, and Phil-Won Yoon, "Fabrication of a 50 nm half-pitch wire grid polarizer using nanoimprint lithography", *Nanotechnology*, 16, pp. 1874~1877(2005).
- (14) Sang-Hoon Kim, Joo-Do Park, and Ki-Dong Lee, "Fabrication of a nano-wire grid polarizer for brightness enhancement in liquid crystal display", *Nanotechnology*, 17, pp. 4436~4438(2006).