

TiO₂ 박막의 나노구조를 이용한 1/4 파장판의 GLAD 증착

Glancing angle deposition of quarter-wave plates using a nano-structured TiO₂ films

우석훈, 황보창권
 인하대학교 물리학과
 woo0124@hanmail.net

입사파의 편광을 변화시키는 위상지연자(retarder)는 수직한 두개의 편광 성분중 하나의 위상을 다른 편광 성분에 비해 일정하게 지연시킴으로써 편광상태를 변화시키는 광학소자로 위상지연 정도에 따라 전파장판, 1/2 파장판, 1/4 파장판 등이 있다[1]. 이러한 위상지연자는 optical isolators, phase-contrast microscope, 디스플레이 소자 등에 사용된다. 특히 1/4 파장판(quarter-wave plate)은 두개의 수직한 편광성분 사이의 상대위상이 $\Delta\phi = \frac{\pi}{2}$ 가 되도록 만든 광학부품으로 선편광된 빛을 타원편광(또는 원편광)으로, 타원편광(또는 원편광)을 선편광으로 만드는 역할을 한다. 보통 이러한 1/4 파장판은 수정, 운모, 또는 유기중합 폴리머 등 물질의 광학적 비등방성을 이용한 것으로 전기장의 진동방향에 대해 서로 다른 굴절률(Δn)을 가지는 복굴절(birefringent)을 이용하여 만들어지며, 두께를 조절함으로써 위상지연($\Delta\phi = \frac{2\pi d}{\lambda} \Delta n$)을 조절하게 된다.

최근 경사입사 증착법(glancing angle deposition)으로 증착된 유전체 박막의 비등방성을 이용하여 이러한 위상지연자의 구현이 시도되고 있으며, 이러한 위상지연자를 광학박막으로 증착할 경우, 결정을 사용하는 경우에 비해 저렴하면서도 대면적이 가능하며, 폴리머에 비해 외부 온도에 강한 위상지연자를 만들 수 있다는 장점이 있다. 증발입사가 기관에 경사 입사하는 경사입사 증착법의 경우, 박막이 성장 하는 동안 기둥 미세구조와 그림자 효과에 의해 다공성의 미세구조를 형성하게 되고, 증착 입사의 경사각(α)에 의해 박막 미세 기둥은 경사지게 성장하게 되어 나노 기둥구조의 비등방성에 의해 광학적으로 비등방성을 갖게 된다. 또한 박막의 나노 기둥구조의 조절을 통해 박막의 조밀도를 조절할 수 있으며, 이러한 다공성의 나노 미세구조에 의해 굴절률이 감소하는 특징이 있다[2].

본 연구에서는 가시광선 영역에서 흡수가 거의 없어 투명하고, 고굴절률 물질인 TiO₂ 박막을 경사입사 증착법으로 증착하고, TiO₂ 박막의 나노 미세구조에 따른 박막의 광학적 특성을 조사하기 위하여 경사입사 각을 변화시키고 기관을 회전시키며 증착한 박막의 나노구조를 SEM을 이용하여 조사하고, 분광광도계와 타원분광광도계를 이용하여 박막의 비등방 광학특성을 조사하였다. 기관을 고정시키고 경사입사 증착법으로 증착한 TiO₂ 박막의 나노 기둥구조는 경사구조(tilted structure)를 가졌으며, 경사입사각이 증가함에 따라 박막 나노 미세기둥의 경사각이 증가하고, 그림자 효과에 의해 박막내의 빈공간이 증가하여 박막의 굴절률이 감소하였다. 경사입사각이 증가함에 따라 비등방구조를 갖는 나노 기둥구조에 의해 박막의 광학적 비등방성이 증가하였으며, 경사입사각이 $\alpha=60^\circ$ 일 경우 532 nm 에서 $\Delta n= 0.063$ 으로 가장 큰 비등방성을 나타냈다. 기관을 고정시키고 기관을 180° 씩 회전하며 증착한 TiO₂ 박막의 나노 기둥구조는 지그재그 구조(zigzag structure)를 가졌으며, 경사구조의 나노 기둥구조를 갖는 박막과 광학적으로 매우 유사한 특성을 나타내었다. 특히 지그재그 구조를 갖는 박막의 경우, 기관이 180° 로 회전하기 때문에, 기관을 회전하지 않고 증착하는 경사구조의 박막에 비해 균일한 두께의 박막을 증착할 수 있었다. 반면, 기관을 회전하며 증착한 경우, 박막의 미세 나노기둥 구조는 기관에 수직한 방향으로 나선형 구조(helical structure)를 가지는 박막으로 성장하였으며, 기관을 회전하며 증착한 박막은 경사입사각이 0° 에서 80° 로 증가함에 따라 그림자 효과에 의해 굴절률이 2.04에서 1.56으로 감소하였다. 하지만 기관 표면에 대해 나선형의 균일한 나노 기둥구

조를 가지므로 광학적으로 거의 등방적인 특성을 나타내었다. 박막의 나노구조에 따른 광학적 비등방 특성을 조사한 결과, 경사입사각이 $\alpha=60^\circ$ 일 경우, 비등방성이 가장 큰 박막을 증착할 수 있었으며, 이를 이용하여 532 nm 파장영역에서 위상차가 90° 가 되도록 1/4 파장판의 박막 두께를 결정하였다.

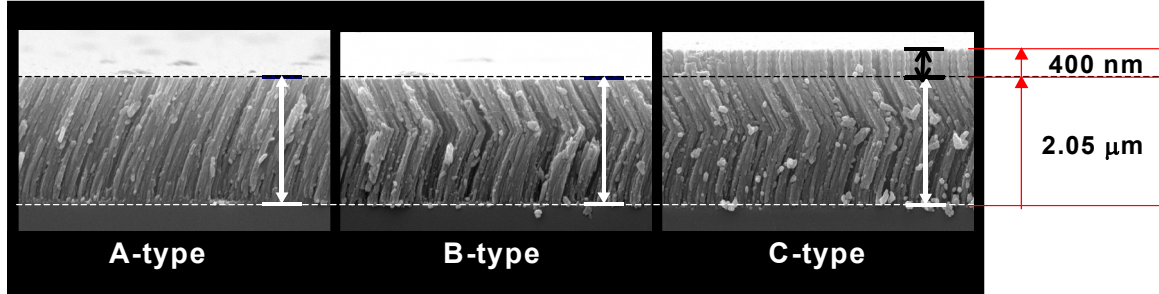


그림 1. 3가지 형태의 1/4 파장판(QWP)의 SEM 단면 이미지. A-type: 경사 구조($\alpha=60^\circ$), B-type: 지그재그 구조($\alpha=60^\circ$), C-type: B-type위에 400 nm의 나선형 구조($\alpha=80^\circ$)를 추가한 구조

그림 1에 3가지 형태로 증착한 1/4 파장판의 단면을 나타내었다. 경사 구조(A-type)과 지그재그 구조(B-type)의 경우, 박막 전체의 두께가 약 $2.05\mu\text{m}$ 로 증착되었음을 보여준다. C-type의 경우, 지그재그 구조의 B-type 위에 나선형 구조($\alpha=80^\circ$)의 박막이 400 nm 증착되었음을 보여준다. 위의 3가지 형태의 1/4 파장판은 모두 파장에 따른 위상차 측정 결과 위상차가 거의 같음을 그림 2 (a)에서 보여주고 있으며, $532 \pm 8 \text{ nm}$ 영역에서 위상차가 90° 가 됨을 보여준다. 특히 C-type의 나선형 구조층(400 nm)은 광학적으로 거의 등방성이기 때문에 박막의 위상차에는 영향을 주지 않음을 보여준다. 그림 2(b)는 1/4 파장판들의 투과율 측정값으로, A와 B-type의 경우 파장에 대해 투과율이 거의 같은데 비해 C-type의 경우 투과율이 $532 \pm 8 \text{ nm}$ 영역에서 약 6 ~ 8% 증가하는 함을 보여준다. 이는 C-type의 나선형 구조($\alpha=80^\circ$)층의 굴절률이 $n=1.56$ 으로 $\alpha=60^\circ$ 로 증착한 박막의 굴절률보다 작기 때문에 무반사 코팅의 효과에 의해 A와 B-type에 비해 높은 투과율을 가지는 1/4 파장판이 증착되었음을 보여준다.

경사 입사 증착법을 이용한 TiO_2 박막은 경사입사각과 기관의 회전을 통해 나노 미세구조의 조절과 박막의 비등방성을 조절할 수 있었으며, 박막의 나노 미세구조의 조절을 통해 비등방성이 큰 증착조건을 찾고 이를 이용하여 1/4 파장판을 증착 할 수 있었다. 또한 굴절률이 낮고 등방적인 나선형 구조의 박막을 마지막층에 사용함으로써 위상에는 영향을 주지 않고 1/4 파장판의 투과율을 향상시킬 수 있음을 보였다.

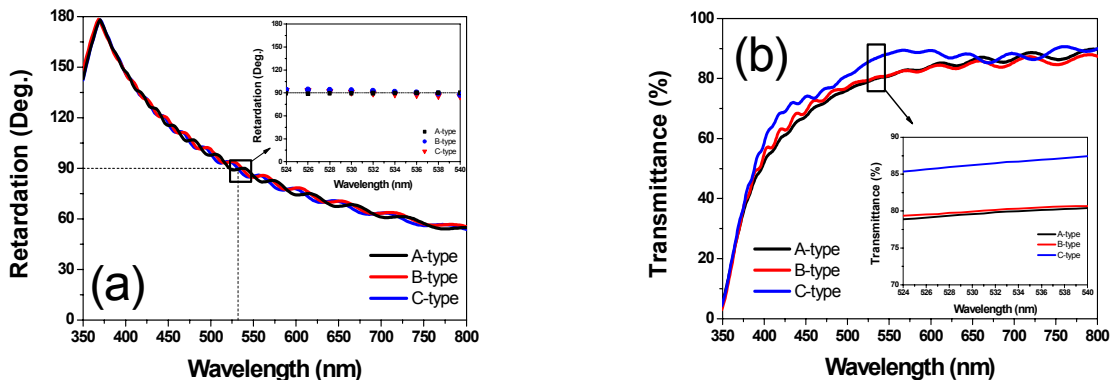


그림 2. 3가지 형태의 1/4 파장판(QWP)의 광학적 특성 (a) 파장에 따른 위상차, (b) 파장에 따른 투과율

1. E. Hecht, *OPTICS*, Addison-Wesley Longman, Inc. USA (1998).
2. T. Motohiro and Y. Taga, *Appl. Opt.* **28**, 13 (1989).