

## 첨가제가 AFD법에 의해 제조된 광소자용 Sodium Borosilicate 박막의 물성에 미치는 영향

정형곤 · 전영운\* · 문중하\*\* · 정석중 · 이형중

전남대학교 자연과학대학 물리학과  
\*정보통신부 정보통신연구관리단  
\*\*전남대학교 공과대학 세라믹공학과

### Effects of Additives on the Characteristics of Sodium Borosilicate Thin Film Fabricated by AFD Method

Hyung G. Chung, Young Y. Chun\*, Jong H. Moon\*\*, Suck J. Chung and Hyung J. Lee

Dept. of Physics, Chonnam National Univ., Kwangju 500-757

\*Institute of Information and Technology Assesment, P.O.Box 76, Yusong, Taejon 305-600

\*\*Dept. of Ceramics, Chonnam National Univ., Kwangju 500-757

(1998년 2월 25일 받음, 1998년 6월 5일 최종수정본 받음)

**초 록**  $Al_2O_3$ 와  $Na_2O$ 가 AFD법에 의해 제조된 sodium borosilicate 유리박막의 특성에 미치는 영향을 조사하였다.  $Al_2O_3$  함량이 증가함에 따라  $66SiO_2-27B_2O_3-7Na_2O$  유리박막의 상분리는 억제되었으며, 6.0wt%의  $Al_2O_3$ 가 첨가되었을 때 공기중 급냉 조건하에서 상분리가 없는 유리박막이 얻어졌다.  $Al_2O_3$  함량이 1.5에서 6.0wt%로 증가함에 따라 유리박막의 굴절율은 1.4610에서 1.4701로 선형적으로 증가하였으며, 복굴절률을 나타내는 TE 모드와 TM 모드의 차이도 점차적으로 증가하였다. 그러나 복굴절률은 유리박막을 전이온도 이하에서 재열처리함으로써 감소시킬 수 있었다.  $66SiO_2-27B_2O_3-7Na_2O+6wt\% Al_2O_3$ 에  $Na_2O$ 의 함량을 증가시켜  $Na_2O/B_2O_3$ 가 0.23, 0.34, 0.45, 0.56인 유리박막을 제작하였다.  $Na_2O/B_2O_3$ 의 비가 증가함에 따라 유리박막의 굴절율 및 복굴절률은 증가하는 경향이 있었다. 또한  $Na_2O/B_2O_3$ 의 비가 증가함에 따라 유리박막의 상분리는 가속화되었다.

**Abstract** The effects of  $Al_2O_3$  and the ratio of  $Na_2O/B_2O_3$  on the phase separation and optical properties of sodium borosilicate glass film fabricated by AFD(Aerosol Flame Deposition) were investigated. When  $Al_2O_3$  of 6wt% was added to  $66SiO_2-27B_2O_3-7Na_2O$  the clear glass film without any crystallization was produced under air-quenching condition after consolidation. As the amount of  $Al_2O_3$  increased from 1.5 to 6.0 wt% the refractive index linearly increased from 1.4610 to 1.4701, and the difference of TE and TM mode causing by residual stress in film increased gradually. However, the difference of TE and TM mode to reveal birefringence could be minimized by annealing below the glass transition temperature after consolidation and air quenching. On the other hand, as the ratio of  $Na_2O/B_2O_3$  increased the refractive index and birefringence of glass film tended to increase, but the measurement of their values were not available at over the critical ratio of  $Na_2O/B_2O_3$  because of the cloudiness due to crystallization. The phase separation was greatly accelerated with increasing the ratio of  $Na_2O/B_2O_3$ .

### 1. 서 론

평판형 광도파로는 유리,  $LiNbO_3$ <sup>1)</sup>와  $PLZT$ <sup>2)</sup> 같은 유전체,  $GaAs$ <sup>3)</sup>와  $InP$ <sup>4)</sup> 같은 반도체, 그리고 폴리머<sup>5)</sup> 등으로 제작된다. 이들 재료중에 유리는 투명성, 화학적 안정성, 저가격, 광섬유와 비슷한 재료와 굴절율로 인한 저광손실 등의 광도파로 재료로서 여러 가지 장점을 가지고 있다.<sup>6,7)</sup> 따라서 유리를 이용한 평판형 광도파로 소자의 제작에 관한 연구는 화염가수분해 (FHD),<sup>8)</sup> 화학증착 (CVD),<sup>9)</sup> 이온교환,<sup>10)</sup> 이온침투,<sup>11)</sup> 스퍼터링,<sup>12)</sup> 졸-겔법<sup>13)</sup> 등의 여러 가지 방법들에 의해 이루어지고 있다. 이들 방법중 가장 광손실이 적은 방법은 CVD (Chemical Vapor Deposition)와 FHD (Flame Hydrolysis Deposition)로 알려져 있다.

CVD나 FHD에 의해 제작되는 유리의 굴절율은 광섬유와 비슷하여 광손실이 매우 적다. 그러나 CVD 방법으로는 두꺼운 유리 박막을 얻을 수 없으며, FHD 방법으로는 유리박막과 기판으로 사용되는 실리콘 기판과의 열팽창계수의 차이로 인해 실리콘 기판이 변형되거나 유리박막에 응력이 유기되어 복굴절을 일으킨다. 또한 휘발성이 매우 높은 염화물만 사용이 가능하여 유리의 조성이 매우 제한적이다. 따라서 이들의 단점을 보완할 수 있는 개선된 방법이 필요하다.

AFD (Aerosol Flame Deposition)<sup>14)</sup> 방법은 FHD 방법에 비해 유리조성의 선택에 제한이 없으며, 실리콘 기판과 비슷한 열팽창 계수를 갖는 Pyrex<sup>15)</sup>나 Vycor<sup>16)</sup> 유리계의 박막을 얻을 수 있어 실리콘 기판의 휨이나 광도파로에서의

복굴절 현상으로 인한 광손실을 줄일 수 있다.

본 연구에서는 AFD 방법에 의해 실리콘 기판위에 광소자용 sodium borosilicate 유리박막을 제작하였다. 본 실험에서 선택한 유리의 조성은 Vycor 유리계로서 열팽창계수는 매우 작으나 열처리 조건에 따라 쉽게 상분리가 일어날 수 있는 조성이다. 따라서 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 Na<sub>2</sub>O/B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 비가 sodium borosilicate 유리박막의 상분리 및 광특성에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 실험방법

AFD (Aerosol Flame Deposition) 방법이란 액상의 졸을 초음파 진동자를 사용하여 에어로졸 입자로 만들고, 산·수소 불꽃으로 산화시켜 기판위에 증착시키는 방법로서 장치의 모식도는 Fig. 1과 같다.

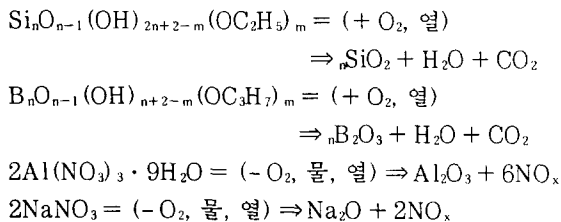
초음파를 이용한 에어로졸 생성법은 에어로졸의 속도와 크기를 임의로 조절할 수 있는 장점을 가지고 있다. 초음파가 액체를 통과하여 액체와 기체의 경계면에 도착하면 그 경계면에서 액체 방울이 생성되며, 이때 생성된 입자의 크기는 액체의 밀도 (ρ<sub>L</sub>)와 표면장력 (σ<sub>L</sub>), 초음파의 각진동수 (ω<sub>0</sub>)에 의하여 식 (1)과 같이 주어진다.

$$D = 0.34 \left( \frac{8\pi \sigma_L}{\rho_L \omega_0^2} \right)^{1/3} \quad (1)$$

윗 식에 의하면 1.5MHz의 초음파가 시료에 가해지면 대략 4μm 크기의 방울이 생성됨을 의미한다.

1) 졸의 제조

Sodium borosilicate 유리박막의 조성은 66SiO<sub>2</sub>-27Na<sub>2</sub>O-7B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+xwt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (x=1.5, 3.0, 4.5, 6.0)와 nSiO<sub>2</sub>-xB<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-yNa<sub>2</sub>O+6wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (n/x=0.23, y/x=0.23, 0.34, 0.45, 0.56)로써 여기에 사용된 시약은 B[(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>CHO]<sub>3</sub>, tetraethyl orthosilicate (TEOS), NaNO<sub>3</sub>, Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·9H<sub>2</sub>O이다. 먼저 TEOS를 메탄올과 물이 1:5으로 혼합된 용매에서 1시간 동안 가수분해 시켰다. 여기에 B[(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>CHO]<sub>3</sub>를 천천히 첨가하여 자석교반기로 교반하면서 3시간 동안 반응시켰다. 준비된 졸용액을 에어로졸 발생기에 넣고 에어로졸을 만들어 토치까지 이송시킨 다음 불꽃반응을 일으키면 다음과 같은 화학식을 거쳐 고체화된 유리 알갱이를 얻을 수 있게 된다.



2) 박막증착

졸용액을 1.5MHz의 초음파 진동자가 부착된 용기에 넣고 에어로졸을 만든다. 에어로졸은 아르곤 가스에 의해 토치로 이송되고, 산·수소 불꽃에 의해 산화반응 되면서 졸

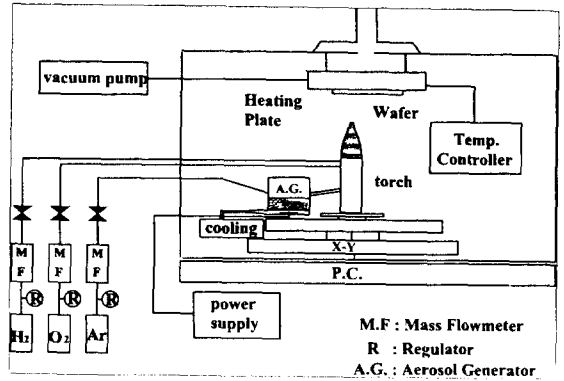


Fig. 1. Schematic diagram of AFD (Aerosol Flame Deposition).

더에 부착되어 있는 실리콘 기판에 증착된다. 이때에 웨이퍼 홀더는 온도조절기를 사용하여 400℃로 유지시켰다. 또한 박막의 두께가 일정하게 증착되도록 토치는 컴퓨터를 이용하여 x, y 방향으로 그물망 모양으로 움직이면서 산화분말을 증착시켰다. 증착된 산화분말의 미세구조는 SEM을 이용하여 관찰되었다.

3) 열처리 공정

증착된 분말의 결정수나 유기물을 제거하기 위하여 500℃ 산소분위기에서 2시간 동안 열처리하였다. 건조된 박막을 1200℃로 유지된 관상로에서 2시간 동안 열처리함으로써 산화분말을 용융시켰다. 열처리 후 공기중에서 급냉시켜 유리박막을 제작하여 조성에 따른 유리박막의 상분리 현상을 광학현미경으로 관찰하였다.

4) 박막의 물성측정

박막의 두께 및 굴절율, 그리고 복굴절률을 헬륨-네온 레이저 광원과 GGG (Gadolinium Gallium Garnet) 프리즘으로 구성된 프리즘 커플러로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

1) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 AFD 방법에 의해 제조된 66SiO<sub>2</sub>-27B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-7Na<sub>2</sub>O의 유리박막의 물성에 미치는 영향

Si 기판위에 증착된 산화분말의 형태는 불꽃의 온도에 따라 달라진다. 본 실험에서 불꽃의 온도는 산소/수소의 비율

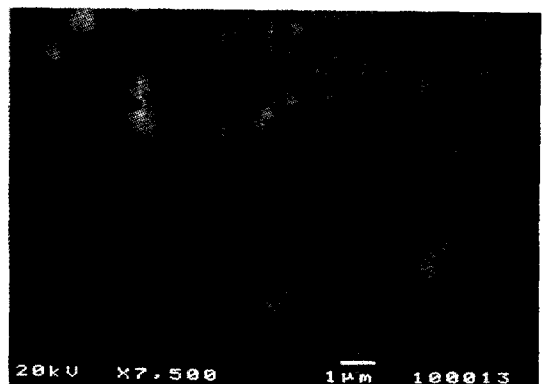


Fig. 2. The microstructure of soots deposited on the silicon wafer.

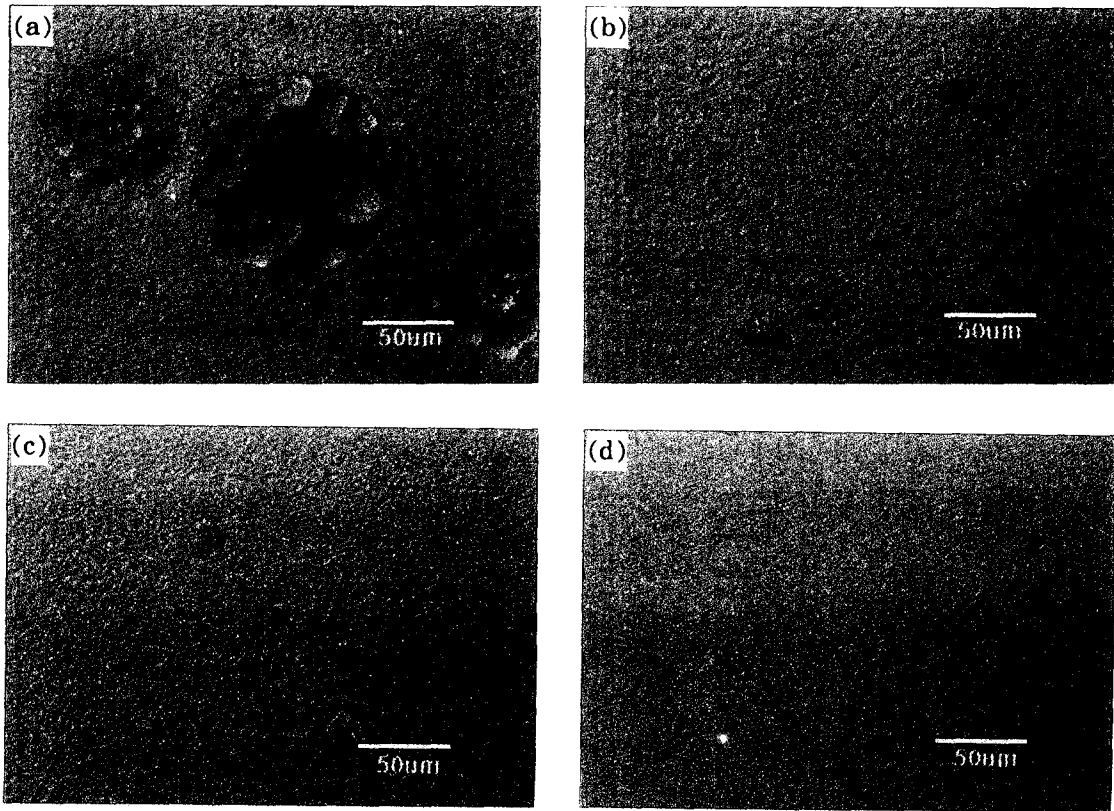


Fig. 3. Optical photographs of  $66\text{SiO}_2-27\text{B}_2\text{O}_3-7\text{Na}_2\text{O} + \text{xwt}\% \text{Al}_2\text{O}_3$  ( $x=(a) 1.5, (b) 3.0, (c) 4.5, (d) 6.0$ ) glass films.

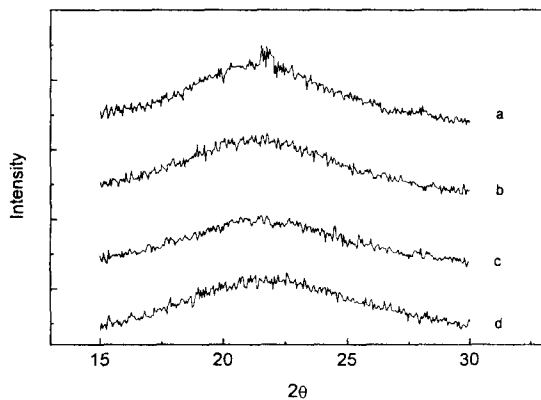


Fig. 4. XRD results of  $66\text{SiO}_2-27\text{B}_2\text{O}_3-7\text{Na}_2\text{O} + \text{xwt}\% \text{Al}_2\text{O}_3$  ( $x=(a) 1.5, (b) 3.0, (c) 4.5, (d) 6.0$ ) glass films.

이나 액상졸에서 메탄올의 양에 의존한다. 산소/수소의 양이 3으로 일정할 때 액상의 졸에서 메탄올/물의 부피비가 낮을수록 1µm 정도의 균일한 크기의 구형입자로만 증착된다. 그러나 메탄올의 함량이 증가함에 따라 입자크기의 분포 (particle size distribution)는 더 커지고, 메탄올/물의 비가 1.5일 때 증착된 산화분말은 Fig. 2에서 볼 수 있는 바와 같이 수 Å 크기의 미세한 입자와 수 µm 크기의 구형입자로 구성된다. 그러나 녹임공정을 거쳐야 하는 본 실험의 경우 입자가 미세할수록 열처리시간이 짧아질 것으로 사료되어 증착된 분말의 미세구조가 Fig. 2와 같이 되도록 공정조건을 제어하였다.

광도파로에서 상분리는 광도파특성을 크게 저하시킨다. Vycor 유리 영역의  $66\text{SiO}_2-27\text{B}_2\text{O}_3-7\text{Na}_2\text{O}$  조성은 일반적으로 상분리가 없는 깨끗한 유리의 제조가 가능하나 냉각속도를 느리게 하거나 소둔 (annealing)에 의해 쉽게 상분리가 일어난다. 본 연구에서는 상분리를 억제하기 위하여  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 를 첨가하였다. Fig. 3은  $\text{Al}_2\text{O}_3$  함량에 따른  $66\text{SiO}_2-27\text{B}_2\text{O}_3-7\text{Na}_2\text{O} + \text{xwt}\% \text{Al}_2\text{O}_3$  ( $x=1.5, 3.0, 4.5, 6.0$ ) 유리박막의 광학현미경사진이다. 시편들은 1250°C에서 2시간 동안 열처리한 후 공기중에서 급냉되었다. 1.5wt%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 가 첨가된 경우 상분리로 인한 50µm이상의 꽃 모양의 결정상이 관찰되나,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  함량이 증가할수록 결정상의 크기

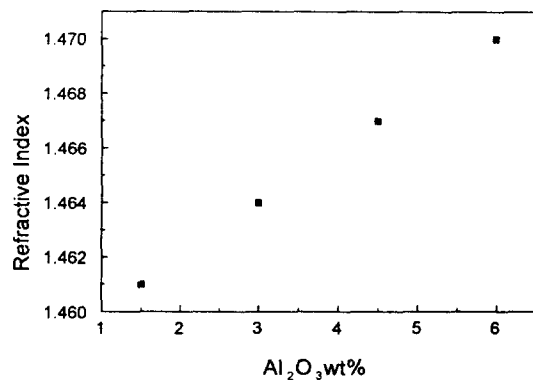


Fig. 5. Refractive index of  $66\text{SiO}_2-27\text{B}_2\text{O}_3-7\text{Na}_2\text{O} + \text{xwt}\% \text{Al}_2\text{O}_3$  ( $x=1.5, 3.0, 4.5, 6.0$ ) glass films.

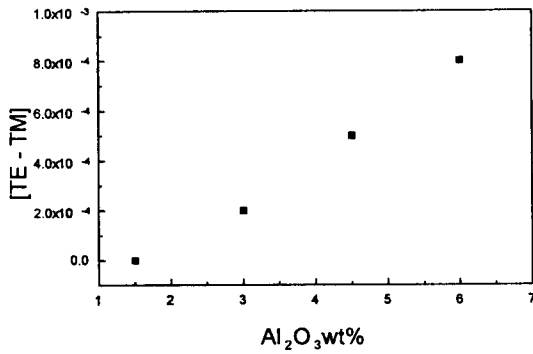


Fig. 6. TE and TM mode spectrum of 66SiO<sub>2</sub>-27B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-7Na<sub>2</sub>O + 1.5wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> glass films.

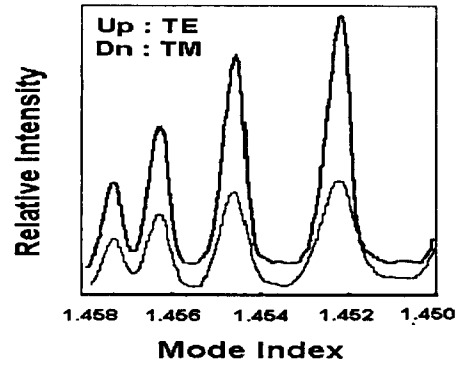


Fig. 7. Birefringence of 66SiO<sub>2</sub>-27B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-7Na<sub>2</sub>O + xwt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (x = 1.5, 3.0, 4.5, 6.0) glass films.

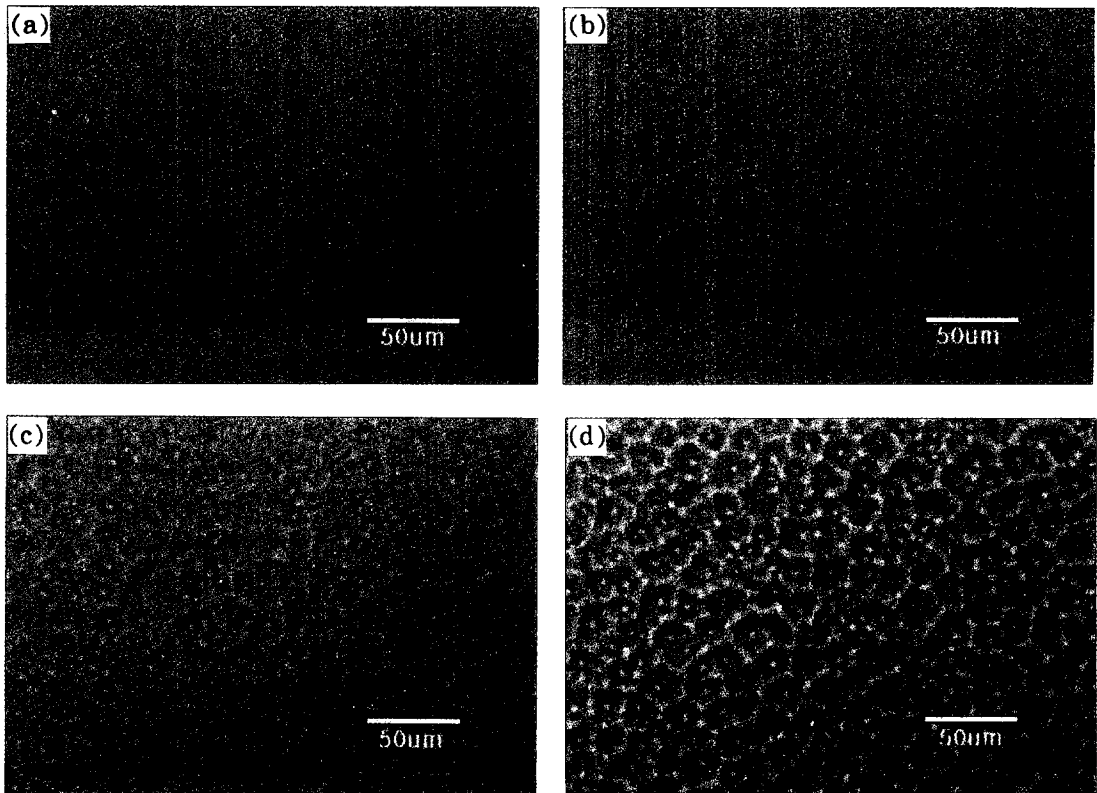


Fig. 8. Optical photographs of 66SiO<sub>2</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Na<sub>2</sub>O + 6.0wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> glass films as a function of the ratio of Na<sub>2</sub>O/B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ((a) 0.23, (b) 0.34, (c) 0.45, (d) 0.56).

는 작아지며, 6wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 첨가된 경우 결정상이 없는 유리박막이 얻어졌다. 또한 결정상이 존재하는 Fig. 3-a, b, c의 유리박막은 표면의 조도가 크나 결정상이 없는 d의 유리박막은 표면의 조도가 매우 작음을 관찰할 수 있다.

한편, Fig. 4의 XRD 결과에서도 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함량이 적은 유리박막에서는 cristobalite 상의 결정상 피크가 뚜렷이 관찰되나 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함량이 증가함에 따라 결정상의 피크가 점점 약해짐을 관찰할 수 있다. 따라서 공기중 급냉 조건하에서 AFD 방법에 의해 제조된 66SiO<sub>2</sub>-27B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-7Na<sub>2</sub>O 유리박막의 경우 상분리로 인한 결정상 생성을 억제하기 위해서는 6wt% 이상의 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 첨가되어야 함을 알 수 있다.

Fig. 5는 프리즘 커플러로 측정된 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함량에 따른 굴절률 변화를 나타낸다. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함량이 1.5에서 6wt%까지 변화될 때 굴절률은 1.4610에서 1.4701로 선형적으로 증가하고 있다.

실리콘 웨이퍼 위에 유리박막을 입히는 경우 박막과 웨이퍼의 열팽창계수 차이로 인하여 응력이 작용하며, 이러한 응력은 TE 모드와 TM 모드의 경로차를 발생시킨다. 광소자에 있어서 TE 모드와 TM 모드의 경로차에 의한 복굴절은 광손실을 유발하는 중요한 요인이다. Fig. 6은 66SiO<sub>2</sub>-27B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-7Na<sub>2</sub>O 유리박막에 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함량이 1.5wt% 첨가된 경우의 TE모드와 TM모드의 굴절률 스펙트

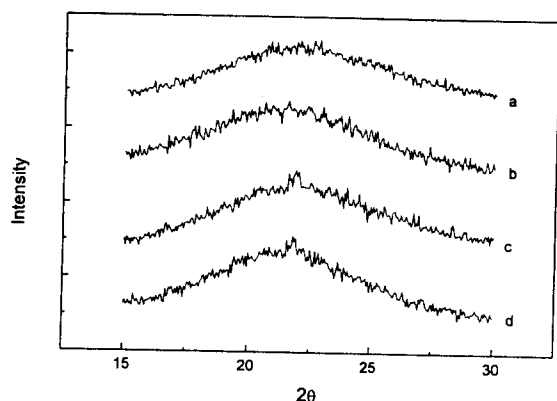


Fig. 9. XRD results of  $66\text{SiO}_2-x\text{B}_2\text{O}_3-y\text{Na}_2\text{O}+6.0\text{wt}\% \text{Al}_2\text{O}_3$  glass films as a function of the ratio of  $\text{Na}_2\text{O}/\text{B}_2\text{O}_3$  ((a) 0.23, (b) 0.34, (c) 0.45, (d) 0.56).

림이다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 두 스펙트럼은 거의 일치하고 있으며, 이는 박막의 복굴절이 매우 작음을 의미한다. Fig. 7은  $\text{Al}_2\text{O}_3$  함량이 증가함에 따른 복굴절을 변화 (TE모우드와 TM모우드 차)를 나타낸다. 복굴절을 변화는 굴절을 변화와 마찬가지로  $\text{Al}_2\text{O}_3$  함량이 증가함에 따라 점차적으로 증가하여, 6wt%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 가 첨가된 유리박막의 복굴절률은  $8 \times 10^{-4}$ 이었다. 그러나 이 값은  $470^\circ\text{C}$ 에서 72 시간 열처리하여 응력을 완화시킴으로써  $2 \times 10^{-4}$ 까지 줄일 수 있었다.

2)  $\text{Na}_2\text{O}/\text{B}_2\text{O}_3$ 의 비가 AFD 방법에 의해 제조된  $66\text{SiO}_2-27\text{B}_2\text{O}_3-7\text{Na}_2\text{O}$ 의 유리박막의 물성에 미치는 영향

$\text{SiO}_2$  함량이 80mol% 이하인 소다 붕규산염유리에는 주성분이 Si인 상과 알칼리를 포함한 B가 주성분인 두 상으로 분리되는 불혼화 영역이 존재하는 것으로 알려져 있다.<sup>16)</sup> 따라서 알칼리 함량과  $\text{B}_2\text{O}_3$  함량의 비는 상분리에 크게 영향을 미칠 가능성이 있다. 본 연구에서는 소다 붕규산염유리박막에서  $\text{Na}_2\text{O}/\text{B}_2\text{O}_3$ 의 비가 증가함에 따라 박막의 물성 변화를 관찰하기 위하여  $66\text{SiO}_2-x\text{B}_2\text{O}_3-y\text{Na}_2\text{O}+6.0\text{wt}\% \text{Al}_2\text{O}_3$  유리박막에  $\text{Na}_2\text{O}/\text{B}_2\text{O}_3$ 가 0.23, 0.34, 0.45, 0.56 되도록  $\text{Na}_2\text{O}$ 와  $\text{B}_2\text{O}_3$ 를 첨가하여 AFD방법으로 유리박막을 제작하였다.

Fig. 8은 각 시편들을 광학현미경으로 관찰한 박막의 표면 사진들이다. 사진 a)는 Fig. 6-d)와 같은 조성의 박막 사진이다.  $\text{Na}_2\text{O}/\text{B}_2\text{O}_3$ 가 증가함에 따라 상분리가 가속되고 있음을 알 수 있다. 또한 각 시편에 대한 XRD 측정 결과를 Fig. 9에 나타내었다.  $\text{Na}_2\text{O}/\text{B}_2\text{O}_3$ 가 증가함에 따라 cristobalite 상의 결정상 피크가 점차적으로 강해지고 있음을 알 수 있다.

Table 1은  $\text{Na}_2\text{O}/\text{B}_2\text{O}_3$ 의 비에 따른 유리박막의 굴절률과 복굴절률을 나타낸다.  $\text{Na}_2\text{O}/\text{B}_2\text{O}_3$ 의 비가 증가함에 따라 굴절률은 증가하는 반면 복굴절률은 감소한다. 그러나  $\text{Na}_2\text{O}/\text{B}_2\text{O}_3$ 의 비가 0.45 이상일 경우 Fig. 6에서 관찰했던 바와 같이 심한 상분리로 인해 굴절률과 복굴절률의 측정이 불가능하였다.

Table 1. Refractive index and Birefringence of  $66\text{SiO}_2-x\text{B}_2\text{O}_3-y\text{Na}_2\text{O}+6.0\text{wt}\% \text{Al}_2\text{O}_3$  glass films as a function of the ratio of  $\text{Na}_2\text{O}/\text{B}_2\text{O}_3$ .

$\text{Na}_2\text{O}/\text{B}_2\text{O}_3$	INDEX	$(\text{TE}-\text{TM}) \times 10^4$
0.23	1.4701	8
0.34	1.4717	7
0.45	측정불가	측정불가
0.56	측정불가	측정불가

4. 결 론

$\text{Al}_2\text{O}_3$ 와  $\text{Na}_2\text{O}/\text{B}_2\text{O}_3$ 의 비가 AFD법에 의해 제조된 광소자용 sodium borosilicate 박막의 물성에 미치는 영향을 조사하였다.

1)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  함량이 증가함에 따라  $66\text{SiO}_2-27\text{B}_2\text{O}_3-7\text{Na}_2\text{O}$  유리박막의 상분리로 인한 결정상 생성은 억제되었으며, 6wt%의  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 가 첨가된 경우 결정상이 없는 박막이 얻어졌다.

2)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  함량이 증가함에 따라  $66\text{SiO}_2-27\text{B}_2\text{O}_3-7\text{Na}_2\text{O}$  유리박막의 굴절률은 선형적으로 증가하였다.

3) 복굴절률은  $\text{Al}_2\text{O}_3$  함량이 증가함에 따라 증가하였으나, 재열처리에 의해 감소되었다.

5)  $\text{Na}_2\text{O}/\text{B}_2\text{O}_3$ 가 증가함에 따라 sodium borosilicate 유리 박막의 상분리가 촉진되었으며, 굴절률과 복굴절률 또한 증가하였다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지정 광전자연구센터의 지원으로 수행되었으며 (과제번호 97K3-0809-01-05-1) 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Bogert, G.A., "TiLiNbO<sub>3</sub> three-waveguide polarization splitter," *Electronics Letters*, **23**(1), 37 (1987)
- T. Kawaguchi, H. Adachi, K. Setcune, O Yamazaki, and K. Wasa, "PLZT Thin-Film Waveguides," *Appl. Opt.* **23**, 2187 (1984)
- Donnelly, J.P., De Meo, N.L. and Ferrante, G.A., "Three-guide optical coupler in GaAs", *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, **LT-1**, 417 (1983)
- G. Muller, L. Stoll, G. Schulte-Roth and U. Wolff, *Electronics Letters*. **26**(2), P. 115 (1990)
- Rick Lytel, "Fundamental performance limits of active polymer integrated optics" *Thin Films for Integrated Optics Application*, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, **392**, 65 (1995)
- M.J. Weber, "Science and Technology of Laser Glass" *Journal of Non-Crystalline Solids* **123**, 208

- (1990)
7. Shimizu, N., "Fusion splicing between deposited silica waveguides and optical fibers," *Electronics and Communications in Japan*, **67-C**(9), 115 (1984)
  8. Kawachi, M., Yasu, M. and Edahiro, T., "Fabrication of SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> glass planar waveguides by flame hydrolysis deposition," *Electronics Letters*, **19**(15), 583 (1983)
  9. Verbeek, B.H., Henry, C.H., Olsson, N.A., Orłowsky, K.J., Kazarinov, R.F. and Johnson, B.H., "Integrated four channel Mach-Zehnder multi/demultiplexer fabricated with phosphorous doped SiO<sub>2</sub> waveguides on Si," *IEEE/OSA Journal Lightwave Technology*, **6**, 1011 (1989)
  10. R.V. Ramaswamy and R. Strivastva, *IEEE/OSA J. of Lightwave Tech.*, **LT-6** (6), 984 (1988)
  11. Patrick W. Leech, Mark C. Ridgway, "Waveguides Fabrication in Fused Silica by Germanium Ion Implantation at Varying Doses," *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* Vol. **392**, 225 (1995)
  12. H.K. Kim, W. Kleemeier, Y. Li, D. W. Langer, D. T. Cassidy, and D. M. Bruce, "Thin-film induced stress in GaAs ridge-waveguide structures integrated with sputter-deposited ZnO films," *J. Vac. Sci. Tech.* **B 12**, 1328 (1994)
  13. R. R. A. Syms and A. S. Holmes, "Reflow and Burial Channel Waveguides Formed in Sol-Gel Glass on Si Substrates," *IEEE Photo. Tech. Letters*, **5** (9), 1077 (1993)
  14. T.F. Morse, A. Kilian and L. Reinhart, "Aerosol Techniques for glass Formation," *Journal of Non-Crystalline Solids*, **129**, 93 (1991)
  15. J.-H. Jean, T.-H. Kuan and T.K. Gupta, "Crystallization inhibitors during sintering of Pyrex borosilicate glass," *J. Mat. Sci. Let.*, **14**, 1068 (1995)
  16. Milos B. Volf "Chemical Approach to Glass," *Glass science and Technology*, **7**, 183 (1984)