

## FHD 공정에 의한 저손실 실리카 슬랩 도파로 형성

심재기 · 김태홍 · 신장욱 · 박상호 · 김덕준 · 성희경

한국전자통신연구원 실리카광부품팀  
(1999년 9월 22일 접수)

### Fabrication of Low Loss Silica Slab Waveguide by Flame Hydrolysis Deposition

Jae Ki Sim, Tae Hong Kim, Jang Uk Shin, Sang Ho Park, Dug Jun Kim and Hee Kyung Sung

Silica Optical Component Team, Electronics and Telecommunication Research Institute, Daejeon 305-350, Korea

(Received September 22, 1999)

#### 초 록

평면형 광수동소자를 구현하기 위한 실리카(silica) 슬랩 도파로(slab waveguide)를 실리콘 기판위에 FHD(Flame Hydrolysis Deposition) 공정으로 형성하였다. 슬랩 도파로의 구조는 하부 클래드(lower clad)층과 코어(core)층으로 구성되며, 코어층 굴절률을 제어하기 위하여  $\text{GeO}_2$ 를 첨가하였다. FHD 공정에서  $\text{GeO}_2$ 를 첨가한 실리카 미립자 형성은 비구형의 발생으로 증착밀도가 낮아져 우수한 도파로 형성이 어렵다. 화염온도와 기판이동 등의 변수를 제어하여 실리카 코어층 미립자를 형성하고 SEM, TEM으로 관찰하였다. 고밀화된 실리카 코어막은 화염온도의 증가에 따라 표면조도(Surface Roughness)가 최저 3.6 nm로 낮아졌다. 하부 클래드층과의 굴절률 차이( $\Delta n$ ) 0.3%, 두께 8  $\mu\text{m}$ 으로 형성된 슬랩 도파로는 1310, 1550 nm 파장, TE모드에서 각각 <0.04, <0.06 dB/cm로 저손실 특성을 보였다.

#### ABSTRACT

Silica slab waveguide was fabricated on Si substrates by FHD for planar optical passive devices. The slab waveguide consists of lower clad and core layers, where core layer index is controlled by  $\text{GeO}_2$  addition. Doping of  $\text{GeO}_2$  in silica is difficult because of the low deposition density due to nonspherical particle generation in FHD process. Silica core particles deposited at various conditions such as flame temperature and substrate scanning were analyzed by SEM and TEM. As the flame temperature increased, the surface roughness of the core layer was decreased up to 3.6 nm after consolidation. Index difference and thickness of core of slab waveguide were 0.3%, 8  $\mu\text{m}$  respectively. Measured optical loss at TE mode was <0.04 dB/cm at 1.3  $\mu\text{m}$  and <0.06 dB/cm at 1.55  $\mu\text{m}$ .

**Key Words :** Flame hydrolysis deposition, Silica slab waveguide, Consolidation

#### 1. 서 론

100 Gbps 이상의 대용량 광통신에 다분기 광분기거나 DWDM(Dense Wavelength Division Multiplexer) 등의 다채널 광수동소자가 요구되고 있다. 기존의 광수동소자는 광섬유를 이용한 섬유형 소자가 주를 이루나 공정 특성상 집적성이 까다롭고 부피가 큰 단점으로 다채널 소자 적용이 어렵다. 평면도파로형 광소자(PLC, planar lightwave circuit)는 기판상에 광소자를 집적시킨 방법으로 다채널 및 기능성 소자를 구현할 수 있다. 평면도파로형 광소자 제작에 사용되는 소재는 반도체, 실리카, 폴리머 등이며, 실리콘 혹은 실리카 등의 기판을 사용한다. 실리카를 소재로 사용하는 경우 광섬유와 재질이 유사하여 전송손실이 적고 광섬유와의 접속손실이 낮은 장점이 있다. 실리카 도파로 제조 방법에는 FHD(Flame Hydrolysis Deposition),<sup>1)</sup> CVD(Chemical Vapor Deposition),<sup>2,3)</sup> Sol-gel,<sup>4)</sup> Aerosol<sup>5)</sup>등이 있다. FHD법은 비교적 증착속도가 빠르고 후막형성이 용이하며, 도파로

단면과 광섬유 코어 크기가 유사하여 접속손실이 낮은 잇점이 있다. FHD 공정에서 실리카막의 굴절률 및 고밀화 온도를 제어하기 위한 도펀트로 B, P, Ge등이 사용된다. 실리카 광도파로는 하부클래드(lower clad), 코어(core), 상부클래드(upper clad)로 구성된다. 실리카막의 기본 조성은  $\text{B}_2\text{O}_3$ - $\text{P}_2\text{O}_5$ - $\text{SiO}_2$ (BPSG, Boro-Phospho-Silicate Glass)계로 구성되며,  $\text{B}_2\text{O}_3$ 의 경우  $\text{SiO}_2$ 와의 결합특성이 우수하여 도핑이 용이하지만  $\text{P}_2\text{O}_5$ 의 경우 낮은 용점(580°C)과 증발특성 등으로 안정한 실리카막 형성이 어렵다.  $\text{P}_2\text{O}_5$ 의 효과적인 도핑으로 광학적 특성이 우수한 실리카막 형성의 실험결과는 기 보고하였다.<sup>6)</sup>  $\text{GeO}_2$  도핑의 경우  $\text{GeCl}_4$ 가 화염 온도가 낮을 때 열분해반응 효율이 낮으며, 비구형의 미립자가 발생하는 문제가 있다. 비구형의 미립자는 증착밀도 등에 영향을 주며, 고밀화되어도 표면 조도가 나빠진다. 본 실험에서는 FHD 공정으로 실리카 코어 미립자를 형성할 때 화염온도 등의 제어를 통하여 미립자 증착밀도를 높이고 굴절률과 두께를 제어하여 저손실의 실리카 슬랩도파로를 형성하였다.

2. 실험방법

FHD법은 고온(1400~1850°C) 산수산화염에 염화물 원료를 인입하여 열분해와 가수분해 반응으로 산화물 미립자를 기판에 증착시키는 방법이다. FHD 장치는 가스조절장치, 버블러, 항온조, 반응장치로 구성되고 반응장치에 토치와 기판 장착대가 구성되었으며, 자세한 내용은 기보고된 참고문헌에 기술되어 있다.<sup>6)</sup> 코아층을 형성하기 위하여 사용된  $GeCl_4$ 는  $SiCl_4$ 와 동일한 항온조에 설치하여 35°C로 항온하였다. 광섬유 모재제조에서  $GeCl_4$ 는 화염 온도가 낮을 때 열분해반응 효율이 낮고 1800°C 이상의 고온에서도 미반응으로 남는 것으로 보고되었다.<sup>7)</sup> 특히 FHD법에서는 구형의 미립자보다 aggregation된 비구형의 미립자 발생률이 높은 특성을 갖는다. 본 실험에서는 화염온도를 조절하여 코아층 미립자의 형태, 크기, 증착밀도등에 미치는 영향을 관찰하였다. 코아층은 하부 클래드층위에 증착되어 슬랩 도파로를 형성하며, 하부 클래드층은 BPSG계 조성으로 20  $\mu m$  이상 형성하여 광도파로 실리콘 기판의 영향을 최소화하였다. 화염온도는 최고 1850°C까지 수소의 유량으로 조절하였고, 염화물 원료 인입시 200°C 이상 낮아진다. 클래드층과 코아층의 굴절률 차이  $\Delta n$ 과 두께를 제어하기 위하여  $GeCl_4$  유량과 기판 장착대의 이동속도를 변화시켜 성막하였다. 형성된 미립자층은 전기로에서 20°C/min의 승온속도로 가열하고 1200~1300°C에서 2시간 유지하여 고밀화하였다. 실리카 미립자의 크기와 형상은 SEM과 TEM으로 관찰하였으며, EPMA(Electron Probe Mass Analyzer)로 조성을 분석하였다. Fiber Interferometer를 이용하여 고밀화된 실리카막의 표면조도를 측정하였고 프리즘 커플링법<sup>9)</sup>으로 굴절률과 두께를 측정하였다.

형성된 실리카 슬랩도파로의 광도파손실을 1310, 1550 nm 파장대에서 측정하였다. 광도파손실의 측정방법은 광출력시키는 방법에 따라 분류할 수 있으며, 절단법,<sup>9)</sup> 산란법,<sup>10)</sup> 프리즘 커플링법<sup>11,12)</sup> 등이 있으나, 본 실험에서는 산란이 적은 고굴절의 실리카에 정밀한 측정을 적용할 수 있는 프리즘 커플링법을 이용하여 측정하였다. 프리즘 커플링법은 굴절률 정합액의 굴절률이 코아층보다 높을 때 프리즘을 통하여 도파되는 광이 정합액으로 결합되어 도파된 광도를 감지하는 방법이다. 기판을 정합액 깊이방향으로 이동시키면 광도가 증가되며, 이동거리에 따른 광도변화로 도파손실을 측정할 수 있다. 실리카 코아층의 굴절률이 1.487인 정합액을 사용하였다.

Fig. 1은 굴절률 정합액을 이용한 실리카 슬랩도파로의 광도파 손실 측정장치의 개략도를 보인 것이다. 이 장치는 레이저 및 거울로 이루어진 광원, 레이저를 슬랩도파로에 결합시키는 프리즘 커플러, 정합액이 담긴 유리용기 및 정합액을 통해 나오는 광도 측정용 광감지기(photo detector)로 구성되어 있다. 광원은 He-Ne 레이저(632.8 nm)와 반도

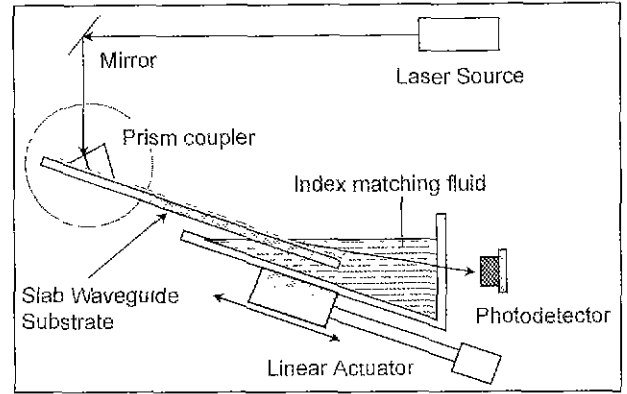


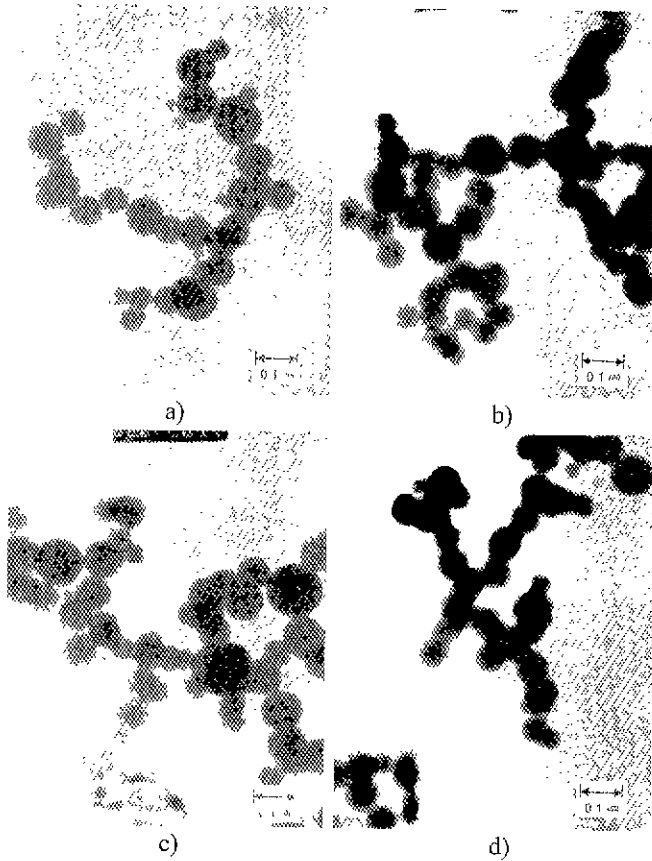
Fig. 1. Schematic diagram of optical propagation loss measuring system.

체 레이저(1300, 1550 nm)를 사용하였고 dichronic mirror를 사용하여 하나의 광로로 레이저 광원을 유도하고 프리즘에 입사시켜 정합액으로 결합되어 출력되는 광도를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

실리카 코아층 미립자의 화염온도 의존성을 관찰하기 위하여 수소유량 3500~4250 sccm, 산소유량 7000 sccm에서 미립자를 형성하였다. Fig. 2는 기판에 증착된 미립자를 포집하여 알코올에 분산시킨 후 그리드(Grid)에 부착시킨 미립자의 TEM 사진이다. Fig. 2(a)는  $B_2O_3$ 와  $P_2O_5$ 의 함유량이 각각 0.4, 1.2 wt%인 클래드(BPSG)층의 미립자를 보인 것으로 0.1  $\mu m$  이하의 구형 미립자가 분포됨을 알 수 있다. BPSG에  $GeO_2$ 가 첨가되면 비구형 혹은 necking이 발생되어 구형 미립자의 분포가 적어진다. Fig. 2(b)는 Fig. 2(a)와 동일한 조성에 수소유량 3500 sccm에서  $GeO_2$ 를 5.4 wt% 첨가한 것으로 미립자간의 결합으로 입자가 연결된 necking 구조와 비구형의 형상을 보였다. Fig. 2(c)는 수소유량 4250 sccm에서 발생한 미립자를 보인 것으로 Fig. 2(b)의 미립자보다 necking이 적고 비교적 구형의 미립자가 분포되었다.  $GeO_2$ 의 첨가(>5 wt%)로 미립자의 용융점이 낮아진 것과 광섬유 모재 제조와 같이  $GeO_2$ 의 aggregation에 따른 영향으로 necking이 발생된 것으로 판단된다.

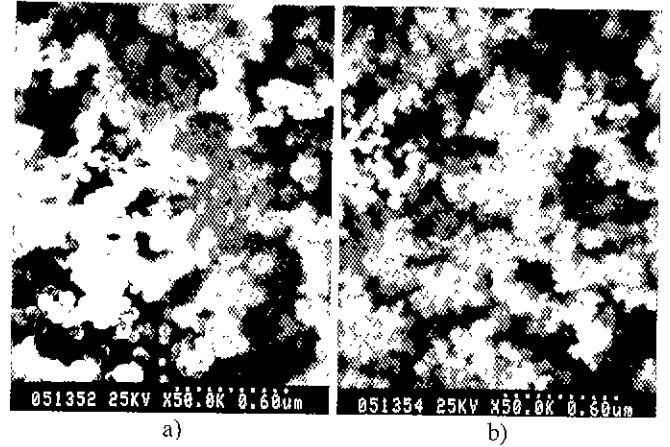
$B_2O_3$ 와  $P_2O_5$ 의 함유량이 각각 1.1, 2.3 wt%이고  $GeO_2$ 가 포함되지 않은 경우 Fig. 2(d)에 나타난 것과 같이 necking이 심화되어 고리모양을 형성하였다.  $B_2O_3$ 와  $P_2O_5$ 의 함유량이 증가하면서 실리카 미립자의 용점이 낮아져 미립자간의 액상 반응이 이루어진 것으로 보인다.  $GeO_2$ 가 첨가된 경우 수소유량이 증가함에 따라 반응시간이 짧아 미립자간의 반응이 적게 발생되어 비구형 미립자 분포가 낮은 것으로 판단된다. 비구형 미립자 분포가 증가하거나 입자가 커지면 증착밀도가 낮아져 고밀화된 실리카막에서 표면조도



**Fig. 2.** TEM images of silica particles a) low BPSG( $B_2O_3=0.4$  wt%,  $P_2O_5=1.2$  wt%) without  $GeO_2$ , b) low BPSG with  $GeO_2$ , c) low BPSG with  $GeO_2$ , and d) high BPSG ( $B_2O_3=1.1$  wt%,  $P_2O_5=2.3$  wt%) without  $GeO_2$ .

등의 특성이 나빠진다.

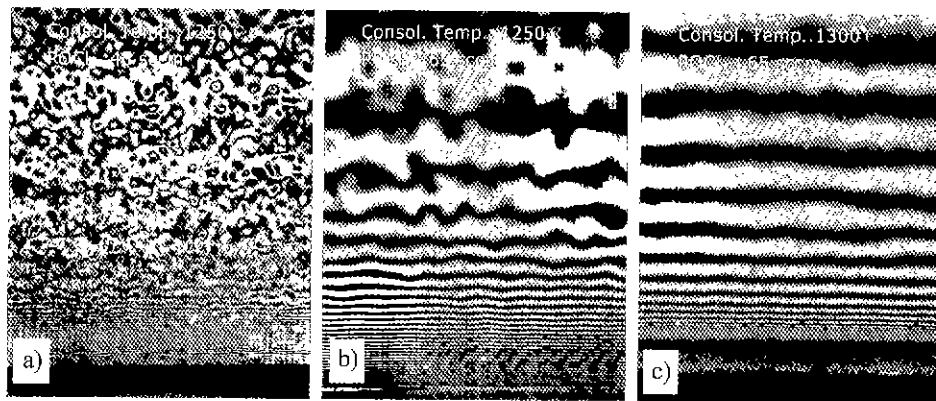
Fig. 3은 기판상에 증착된 미립자의 형태를 보기 위하여 화염에 0.5초간 노출시킨 후 관찰한 SEM사진이다. Fig. 3(a)는 수소유량 3500 sccm에서 형성된 미립자의 형상으로 미립자가 비교적 크고 증착밀도가 낮은 것으로 관찰되었다. Fig. 3(b)는 수소 유량이 4250 sccm인 실리카 미립자를 보



**Fig. 3.** SEM images of silica particles a)  $H_2=3500$  sccm and b)  $H_2=4250$  sccm ( $GeCl_4=35$  sccm).

인 것으로 미립자의 크기가 작고 증착밀도가 높은 것을 알 수 있다. TEM 결과와 유사하며, 수소유량이 증가하면 화염의 길이가 증가하여 반응 시작점에서의 거리가 짧아져 입자가 작고 증착밀도가 높아지는 것으로 판단된다. 화염의 끝으로 갈수록 반응길이가 길어져 입자가 크고 necking이 일어나 고리모양을 나타냈다.

Fig. 4는 형성된 실리카 미립자를 고온 전기로에서 열처리하여 고밀화된 시료를 584 nm 단파장 현미경으로 관찰한 표면형상을 보인 것이다. Fig. 4(a)는  $GeCl_4$  35 sccm,  $POCl_3$  45 sccm일 때 열처리 온도 1250°C에서 고밀화된 것으로 표면이 거칠고 막 표면에 미세한 입자가 산재한 형상을 보였다. Fig. 4(b)와 4(c)는  $POCl_3$  유량이 65 sccm이고 고밀화 온도가 각각 1250, 1300°C에서 형성된 코어층의 표면 형상을 보인 것이다.  $POCl_3$  유량만 증가시킨 경우 프린지가 선명하게 형성되고 비교적 매끄러운 표면을 보였으나 미세입자들이 남아있었다. 하지만 1300°C에서 고밀화된 실리카 코어층은 미세입자가 없고 간섭무늬가 선명한 매끄러운 표면 형상을 보였다. 실리카 코어층의 고밀화온도는  $GeCl_4$ 보다는  $POCl_3$ 의 유량에 의존하며,  $GeCl_4$  유량 증가가



**Fig. 4.** Optical interferometric photographs of silica layer after consolidation process ( $GeCl_4=35$  sccm,  $H_2=4250$  sccm, 배율 200배).

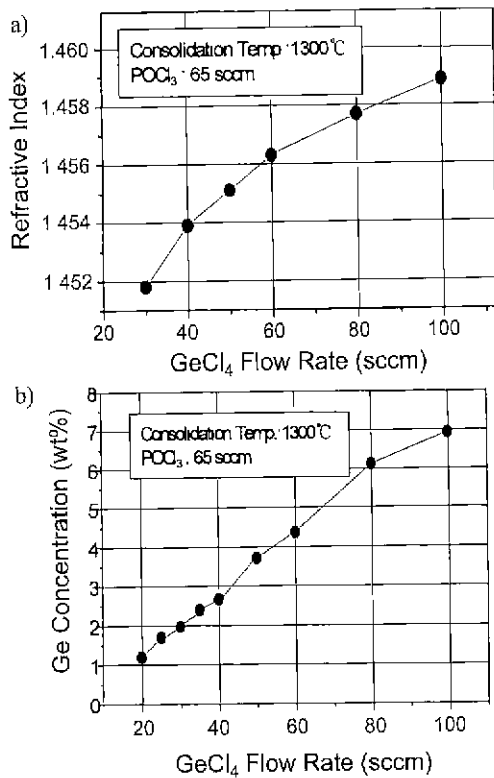


Fig. 5. Silica index and concentration change with GeCl<sub>4</sub> flow rate (H<sub>2</sub>=4000 sccm).

고밀화온도에 미치는 영향은 적다.

Fig. 5(a)와 5(b)는 수소유량 4000 sccm일때 GeCl<sub>4</sub>의 유량 변화에 따른 실리카 코어층의 굴절률과 Ge 조성변화를 나타낸 것이다. GeCl<sub>4</sub>의 유량 증가에 따라 굴절률이 선형적인 증가를 보였고 EPMA로 분석된 Ge 조성도 굴절률 변화에 대응하는 결과를 얻었다. 클래드층의 굴절률 1.448과 비교하여 Δn은 0.25%에서 0.75%까지 분포되었다. 광통신에 사용되는 단일모드 광섬유의 Δn은 0.25~0.3%로 제조되고 low index로 분류되며, 본 실험에서는 코어층의 Δn을 0.3%로 적용하여 슬랩도파로를 형성하였다.

수소유량의 변화에 따른 고밀화 상태를 관찰하기 위하여 표면조도를 측정하여 비교 평가하였다. 표면조도는 fiber interferometer를 이용하여 간섭에 의한 경로차로 발생된 이미지를 분석하여 측정하였다. Fig. 6(a)는 수소유량 3500 sccm인 코어층의 표면 형상을 보인 것으로 조도가 10 nm 정도로 거친 표면을 보였다. Fig. 6(b)는 수소유량이 4250 sccm인 경우 표면 형상을 보인 것으로 표면조도가 3.6 nm로 낮아지고 매끄러웠다. Fig. 6(c)는 수소유량에 따른 실리카막의 표면조도의 변화를 보인 것으로 수소 3750 sccm 이상에서 수소유량이 낮은 경우와 비교하여 표면조도가 급격히 낮아졌다. 수소유량의 증가로 증착밀도가 높아져 표면조도가 낮아지는 것으로 판단되며, 수소유량을 더욱 증가시킨 경우 표면조도가 <1.6 nm로 향상되었다. 하지만 화염온도

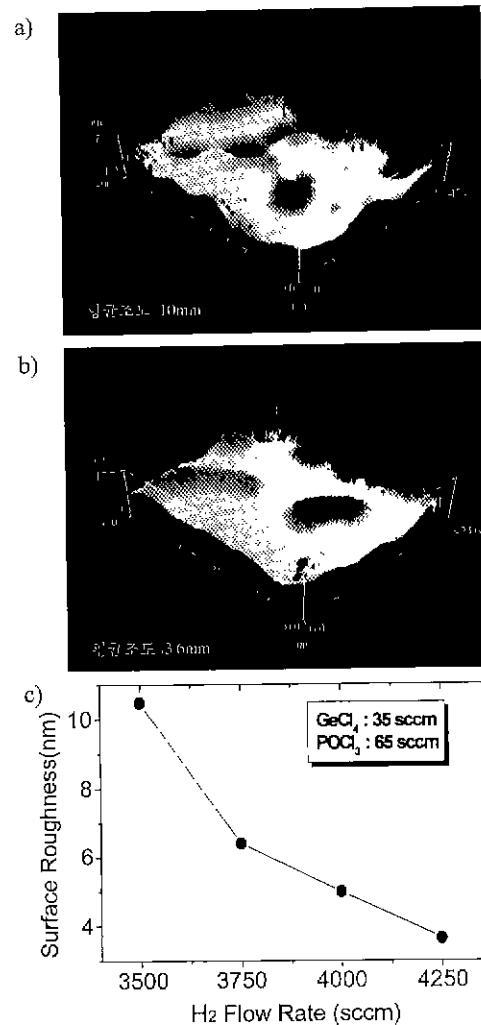


Fig. 6. Surface morphology and roughness plot of core layer for a) surface morphology at H<sub>2</sub>=3500 sccm, b) surface morphology at H<sub>2</sub>=4250 sccm and c) surface roughness plot for H<sub>2</sub> flow rate.

가 상승하여 증착두께도 급격히 얇아지고 실리콘 기판에 열변형이 발생되었다.

화염온도의 변화에 따라 굴절률과 두께의 변화를 관찰하였으며, Fig. 7(a)는 GeCl<sub>4</sub> 35 sccm, 고밀화 온도 1300 °C에서 수소유량에 따른 코어층의 굴절률 및 두께 변화를 나타낸 것이다. 수소유량이 증가함에 따라 굴절률은 증가하는 반면에 두께는 감소하였다. 특히 두께가 수소유량 4000 sccm까지는 서서히 감소하였으나 수소유량 4250 sccm에서 급격한 감소를 보였다. 이러한 두께감소는 수소유량 4250 sccm에서 미립자의 크기가 감소하여 두께가 얇아진 반면에 표면조도가 향상된 것으로 판단된다. 실리카막의 굴절률 증가는 실리카막의 밀도 증가와 GeO<sub>2</sub>의 함유량 증가에 기인한다. Fig. 7(b)는 EP MA로 실리카막의 조성 분석 결과로서 수소유량 변화에 따라 GeO<sub>2</sub>의 함유량이 증가하며, 굴절률 변화와 유사한 경향을 가졌다. 조성분석 결과로 볼 때

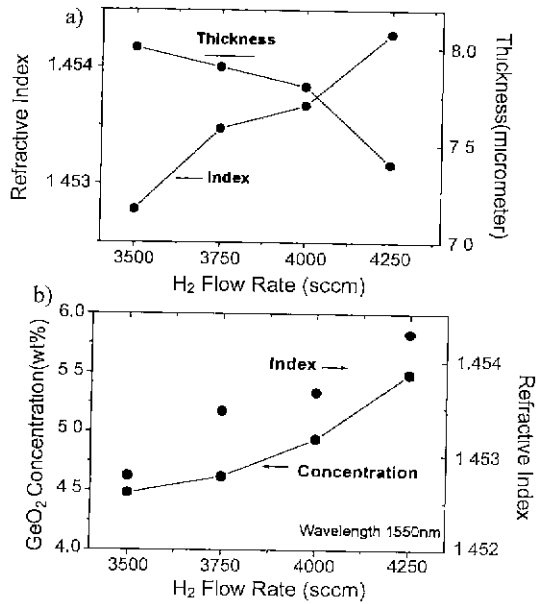


Fig. 7. Refractive index, thickness and GeO<sub>2</sub> Concentration change with H<sub>2</sub> flow rate.

GeO<sub>2</sub>의 함유량이 증가했지만 두께가 감소한 것은 SiO<sub>2</sub>의 함유량 감소로 보이며, 상대적인 GeO<sub>2</sub> 증가가 굴절률 증가에 기인한 것으로 판단된다.

표면조도와 굴절률을 고려한 실리카 코어층의 두께를 조절하기 위하여 수소유량 4250 sccm, GeCl<sub>4</sub>유량 32 sccm의 조건으로 미립자를 형성하였다. 실리카 코어층의 증착률은 항온조의 온도와 원료 이송기체 유량에 의존한다. 하지만 일정한 증착률을 갖는 경우 화염과 기관의 접촉조건 즉 기관 장착대의 이동속도, 반복횟수등에 따라서 변화한다. 기관장착대의 이동속도를 5~10 mm/sec(pulse 100~120)로 조절하고 8회 반복하여 실리카 미립자를 형성하였다. Fig. 8(a)와 8(c)는 pulse 110, 120일 때 형성된 실리카막의 단면 SEM 사진으로 두께가 각각 8.5, 7.2 μm로 측정되었다. 기관장착대의 이동 속도에 따라서 0.5~0.8 μm의 두께 차이를

나타냈으며, Fig. 8(b)는 pulse 115일 때 실리카막의 단면 SEM 사진으로 두께가 8.0 μm으로 측정되었다. 두께 측정은 프리즘 커플링법으로도 측정되었으며, 단면 SEM 두께측정과 오차범위는 ±0.1 μm 이내였다. 기관의 이동속도는 두께 변화와 더불어 굴절률에도 약하게 영향을 미쳤다. Fig. 9는 GeCl<sub>4</sub>의 유량 30, 32 sccm에서 기관 이동속도에 따른 굴절률 변화를 보인 것이다. GeCl<sub>4</sub>의 유량이 30 sccm에서 32 sccm으로 변함에 따라 굴절률이 증가하는 경향을 보였고 이동속도가 감소함에 따라 굴절률이 감소하였다. 같은 반응조건에서 기관의 구동속도가 감소하여 기관과 화염과의 접촉시간이 증가되면 미립자가 증착되는 양은 증가하나 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>의 높은 휘발성 때문에 SiO<sub>2</sub> 보다 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>의 함유량이 감소된다. SiO<sub>2</sub>의 함유량 증가로 굴절률을 증가시키는 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, GeO<sub>2</sub> 함유량의 상대적인 감소로 굴절률이 낮아지는 것으로 판단된다.

두께와 굴절률을 정밀 제어하여 하부 클래드층에 코어층을 8 μm의 두께로 형성하였다. Fig. 10은 형성된 슬랩도파로의 단면에 백색광을 조사한 사진으로 밝은 부분이 광이 도파되고 있는 코어층이고 그 하부에 약간 어둡게 보이는 부분이 하부 클래드층이다. 슬랩 도파로 코어층을 따라 광이 도파되고 하부 클래드층으로 방출되는 광이 적은 것을 관찰하였다.

Fig. 11(a)와 11(b)는 1310, 1550 nm 파장의 광도파손실을 측정된 결과로서 TE<sub>0</sub> 모드에서 각각 0.04 dB/cm 및 0.06 dB/cm로 측정되었고 TM<sub>0</sub> 모드에서 각각 0.1 dB/cm 및 0.09 dB/cm로 측정되었다. TM<sub>0</sub> 모드의 손실이 큰 것은 TM<sub>0</sub> 모드의 전기장이 도파로면에 수직이어서 하부 클래드 및 공기중으로 약화되어 사라지는 evanescent field가 많이 누출되기 때문인 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

평면형 광수동소자를 구현하기 위한 실리카 슬랩도파로를

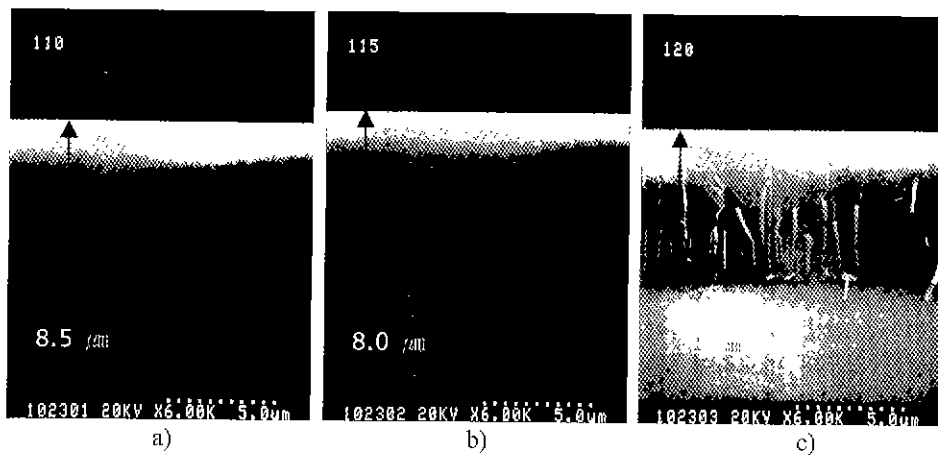


Fig. 8. SEM Photographs of silica core layer for stage scanning Condition.

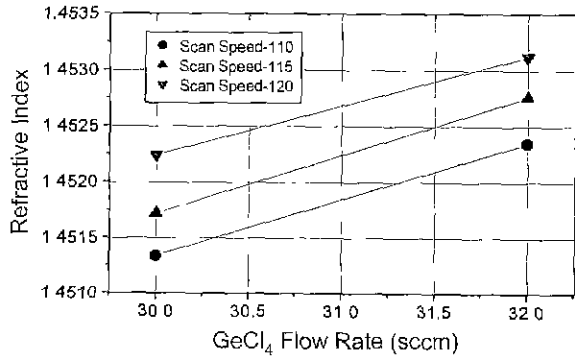


Fig. 9. Refractive index change with GeCl<sub>4</sub> flow rate and scan speed.

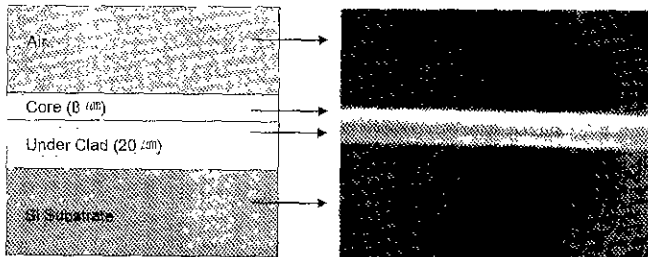


Fig. 10. Structure and IR photograph of silica slab waveguide.

FHD공정으로 형성하였다. BPSG계 실리카로 구성된 하부 클래드층위에 GeO<sub>2</sub>를 첨가한 코어층을 화염온도와 기판이동등의 변수를 제어하여 성막하였다. 화염온도의 조절로 밀착 증착 및 고밀화 특성을 개선하여 표면조도 3.6 nm이하의 투명한 실리카를 얻었다. 화염온도가 높을수록 증착밀도가 높아지고 GeO<sub>2</sub>의 함유량도 증가하여 실리카 코어층의 표면조도 및 굴절률 제어가 용이하였다. 하부 클래드와의 굴절률 차이 Δn 0.3%, 두께 8 μm으로 형성된 슬랩 도파로는 1310, 1550 nm파장의 TE모드에서 각각 <0.04, <0.06 dB/cm의 손실을 갖는 우수한 광학적 특성을 보였다.

REFERENCES

1. M. Kawachi, "Silica Waveguide on Silicon and Their Application to Integrated-Optic Components," *Optical and Quantum Electronics*, **22**, 391-416 (1990).
2. T. Valette and J. P. Jadot, "Si-based Integrated Optics Technologies," *Solid State Tech.*, **Feb.**, 69-75 (1989).
3. H. Verbeek and C. H. Henry, "Integrated Four Channel Mach-Zender Multi/ Demultiplexer Fabricated with Phosphorous Doped SiO<sub>2</sub> Waveguides on Si," *J. Lightwave Technol.*, **6**(6), 1011-1015 (1988).
4. P. Coudray and J. Chisham, "Ultraviolet Light Imprinted

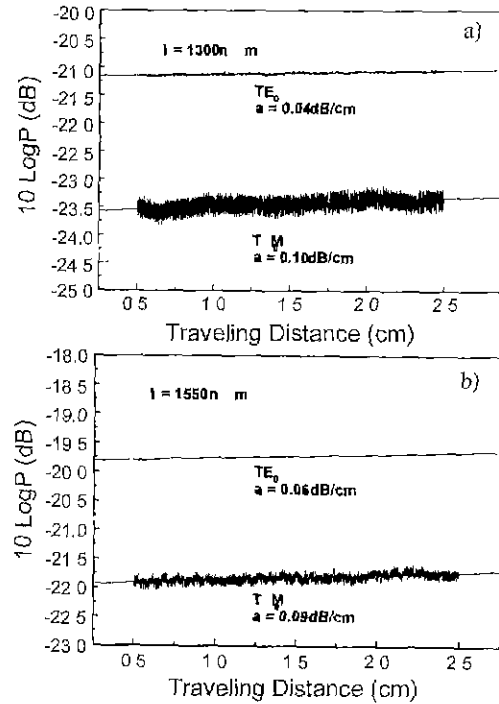


Fig. 11. Optical propagation loss of silica slab waveguide a) at 1.3 μm and b) at 1.5 μm.

Sol-gel Glass Waveguide Devices on Silicon," *Optics Communications*, **128**, 19-22 (1996).

5. F. Morse, A. Kilian and L. Reinhart, "Aerosol Doping Technique for Glass Formation," *J. Non-Crystalline Solids*, **129**, 93-100 (1991).
6. 심재기, 이윤학, 성희경, 최태구, "FHD법에 의한 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-SiO<sub>2</sub> 실리카막의 효과적 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 도핑," *요업학회지*, **35**(4), 364-370 (1998).
7. D. L. Wood and K. L. Walker, "Germanium Chemistry in the MCVD Process for Optical Fiber Fabrication," *J. Lightwave Technol.*, **5**(2), 277-285 (1987).
8. H. J. Lee and S. S. Lee, "Measurement of the Effective Indices of InGaAsP Waveguides by Silicon Prism Coupler," *J. Kor. Phys. Soc.*, **22**(4), 487-491 (1989).
9. R. G. Hunsperger, *Integrated Optics : Theory and Technology*, pp. 83-85, Springer-Verlag, New York, 1982.
10. Y. Okamura, S. Yoshinaka and S. Yamamoto, "Measuring Mode Propagation Losses of Integrated Optical Waveguides : a simple method," *Appl. Optics*, **22**, 3892-3894 (1983).
11. C. C. Teng, "Precision Measurements of the Optical Attenuation Profile along the Propagation Path in Thin-Film Waveguides," *Applied Optics*, **32**(7), 1051-1054 (1993).
12. 성희경, 박상호, 신장욱, 심재기, "굴절률 정합액을 이용한 실리카 슬랩도파로의 전송손실 측정," *한국광학회지*, **10**(2), 174-177 (1999).