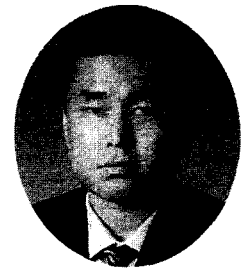


## 평판광회로용 졸-겔 실리카 광도파로 제조



배 병 수

한국과학기술원 재료공학과  
bsbae@sorak.kaist.ac.kr

### 1. 서 론

단일 기판위에 광도파로 회로를 구성하여 광소자를 제조하는 평판광회로(Planar Lightwave Circuits 이하 PLC)는 광기술의 궁극적인 목표인 집적광학을 실현하는 핵심 기술이다. 특히 실리콘기판위에 형성하는 실리카광도파로는 낮은 제조비용, 낮은 광도파손실, 낮은 광섬유 접속손실과 이미 개발된 반도체 제조공정을 이용할 수 있는 장점이 있어 PLC소자 제조에 매우 유용하다. 그리하여 최근 실리카 광도파로를 이용한 광통신용 수동부품의 개발이 활발하다. 실리카 광도파로 제조의 핵심 기술은 두꺼운 실리카막을 실리콘기판위에 증착하는 기술인데 현재는 화염가수분해증착 (Flame Hydrolysis Deposition, 이하 FHD)<sup>[1,2]</sup> 및 화학기상증착(Cheical Vapor Deposition, 이하 CVD)<sup>[3,4]</sup> 기술이 사용되고 있다. 특히, FHD는 두꺼운 실리카막의 증착이 용이하고 증착속도가 높아 생산성이 우수하여서 가장 유망한 기술로서 사용되고 있다. 그러나 실리카막의 치밀화를 위한 높은 소결온도의 사용으로 조성이 제한되고 실리카막에 높은 응력이 걸려 기계적 및 광학적 문제점이 제기되고 있다.

PLC에 사용하는 실리카 광도파로의 실제 소재는 광섬유에서와 마찬가지로 다른 산화물들을 함께 첨가하는 실리카이트 유리(Silicate glass)이다. 그리하여 광도파로 재료의 광손실은 단파장영역에서 레일리산란(Rayleigh scattering)이, 근적외선 파장에서는 OH<sup>-</sup> 흡수가, 적외선 영역에서는 첨가물질의 진동 흡수가 주로 결정한다. 따라서 산란 광손실은 결정화되기 쉬운 물질(예를들어 TiO<sub>2</sub>)의 첨가 및 Dehydration에 의한 OH<sup>-</sup> 생성을 억제하고 가능하면 장파장 적외선흡수가 일어나는 물질을 첨가하여 최소화시킬 수 있다. 또한 OH<sup>-</sup> 흡수는 분위기 서냉에 의해 제거할 수 있다. 이외에 광손실 기구는 접속손실, 기판 손실, 코어 벽(Core wall)에 의한 산란과 광도파로의 굴곡손실을 포함할 수 있다. 광섬유와의 접속손실은 코어의 단면적이

크고(6~8 μm) 모드 한정을 약하게( $\Delta n/n=0.25\sim 0.75\%$ )하여 낮출 수 있다. 그리고 기판 손실은 두꺼운 버퍼층을 사용하여 무시할 수 있다. 코어 벽면의 산란은 코어를 재용융시켜서 구면모양으로 변형시켜 감소시킬 수 있다. 그렇게 하기 위해서는 코어 물질의 용융점을 낮춰야 하는데 이는 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>와 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 첨가시키면 된다. 광도파로 굴곡손실은 크기가 작고 모드한정이 강한(큰  $\Delta n/n$ ) 코어의 제작에 의해 감소시킬 수 있는데 이와 같은 큰 굴절률은 TiO<sub>2</sub>, GeO<sub>2</sub> 및 As<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 첨가에 의해 만들어진다. 결론적으로 실리카 광도파로의 최적 조성은 제조공정 및 소자의 용도 등에 의해 결정될 수 있는데 FHD 공정에서는 GeO<sub>2</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-SiO<sub>2</sub>의 유리 조성이 우수하다고 알려져 있다<sup>[2]</sup>.

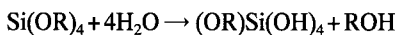
금속알콕사이드 용액의 가수분해(Hydrolysis) 및 축합반응(Condensation)의 화학반응에 의해 위에서 언급한 산화물 유리를 저온에서 제조하는 졸-겔공정을 이용하여 실리카 광도파로를 제조할 수 있다. 졸-겔 공정에 의한 유리의 제조는 기존의 공정에 비해 단순하고 비용이 저렴하고 저온공정이라는 장점이 있다. 실제로 졸-겔 공정을 이용하여 실리카 유리를 제조하여 왔고 최근에는 미국 Lucent사는 졸-겔 공정을 사용하여 광섬유 모재를 제조하는데 성공하였다. 원료용액을 기판위에 코팅하여 건조 및 소결공정에 의해 제조되는 졸-겔 필름은 성능이 매우 우수하며 다양한 광학 및 기능성 코팅에 사용되고 있다. 따라서 졸-겔필름을 이용한 실리카 광도파로의 제조도 가능하여 이에 대한 연구가 활발히 수행되어 왔다. 그러나 졸-겔 공정은 공정상에 재료의 급격한 수축이 동반되어 이에 따른 큰 응력이 발생되어 수 μm 이상 두께의 막에서는 균열이 생성되어 실리카 광도파로 제조의 최대 문제점이었다. 그러나 영국 Imperial College의 R. Syms 교수팀은 졸-겔 스펀코팅 후에 Rapid Thermal Annealing에 의한 열처리의 반복에 의해 30 μm 이상의 균열없는 두꺼운 실리카막을 제조할 수 있는 Spin Coating and Rapid Thermal Annealing(SC-RTA) 기술을 개발하였다<sup>[5,6]</sup>. 그리하여 이 연구팀은 졸-겔 실리카막을 이용하여

PLC 및 미세전자소자(Microelectromechanical device)에 적용하는 활발한 연구를 진행 중이다. 따라서 본 논문에서는 졸-겔 실리카 광도파로 제조공정과 연구결과를 소개하고 기존의 실리카 광도파로 제조기술에 대한 대체기술로서의 가능성에 대해서 논의하겠다.

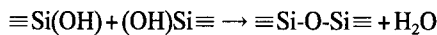
## 2. 졸-겔 실리카막의 광도파로 응용

졸-겔공정은 저온에서 균일하고 고순도의 산화물 유리를 박막 및 Monolith는 물론 분말과 섬유형태로 용이하게 제조할 수 있는 제조공정이다. 여기서 졸(Sol)이라는 것은 콜로이드 고체 분자들이 분산되어 있는 현탁액 상태를 말하고 반응이 지속됨에 따라 분산된 고체 분자들이 고분자화됨에 따라 연속적인 고체 망목구조(Network structure)를 이루어 유동성을 잃게 되는 상태를 겔(Gel)이라고 한다. 주로 금속알콕사이드(실리카일 경우  $\text{Si(OR)}_4$ , R=Alkyl)를 출발물질로 사용하여 물과 알코올의 혼합용액을 만들어 산 또는 염기의 촉매를 첨가하면 다음과 같은 가수분해 및 축합반응의 연속적인 반응에 의해 산화물(실리카) 고분자화되어 졸상태에서 겔상태로 전이하는 겔화(Gelation)를 이루게 된다.

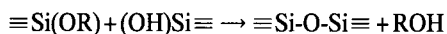
<가수분해>



<축합반응>



물축합반응



알코올축합반응

이와 같은 졸-겔전이 중에 적당한 점도상태에서 원하는 형태로 성형을 하게 된다. 예를 들어, Monolith 경우 몰드에 졸용액을 Cast하고 박막이나 광도파로는 기판위에 Spinning이나 Dipping에 의해 졸용액을 코팅한다. 이와 같은 성형공정 이후에 겔화가 지속되고 그 이후에 용매 및 유기물을 제거하고 치밀화시키는 건조 및 소결 열처리 공정에 의해 산화물(실리카)을 제조하게 된다. 졸-겔공정은 제조가 용이하고 공정이 간단하여 장치비용이 적게들어 제조비용이 저렴하다. 그리고 산화물 조성의 조절과 기능성 분자의 첨가가 가능하여서 재료의 특성 조절 및 기능성 부여가 용이하다. 특히, 졸-겔공정은 다양한 기능의 코팅에 폭넓게 사용되고 있는데 무반사 코팅과 같은 광학코팅의 활용성이 매우 높다. 그리하여 많은 연구자들이 졸-겔 실리카 박막 제조기술을 광도파로제조에 적용하는데 관심을 가져 왔다. 1972년에 최초로 Ulrich와 Weber는,  $0.9 \mu\text{m}$  두

께의 Lead silicate( $\text{PbO-SiO}_2$ ) 광도파로를 제조하여  $1.064 \mu\text{m}$  파장에서 TE편광의 광도파손실  $0.3 \text{ dB/cm}$ 를 관측하였다<sup>[7]</sup>. 그 이후에 Roncone et al.은 Titanium silicate( $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ ) 졸-겔 실리카 광도파로를 제조하여 실제로 응용하여서 집적 광부품을 개발하였다<sup>[8]</sup>. 그들은 졸-겔 광도파로를 프리즘이나 Grating으로 광접속을 하였으며 겔상태의 막을 회절구조로 Embossing한 후 열처리 하여서 Surface-relief gratings를 제작하였다. Titanium silicate 졸-겔 광도파로는 Weinsenboch et al.에 의해서 공정변수에 따른 광도파특성의 변화가 깊이 연구되었다<sup>[9]</sup>. 그러나 연구결과는 막제조시에 생성되는 균열, 시간에 따른 광특성이 변화하는 Aging effect 등 졸-겔광도파로의 응용에 부정적이었다. 특히, 졸-겔광도파로의 근본적인 문제점은 겔화, 건조 및 소결에 의한 평면상의 수축이 막의 기판과의 접착에 의해 한정되지 못하면 막에 인장력이 걸려 균열이 생성되어 균열없는 졸-겔 실리카막의 두께가 실리콘 기판위에서  $0.5\sim 1.5 \mu\text{m}$ 로 한정되는 점이다. 그럼에도 불구하고 그 이후에도 Yang et al.은  $\text{SiCl}_4$  촉매를 사용하여 균질성이 증가한 Titanium silicate 광도파로를 제조하여  $514 \text{ nm}$ 에서  $0.2 \text{ dB/cm}$  이하의 광도파 손실을 획득하였다<sup>[10]</sup>. 그러나 이 광도파로막의 두께도  $1.3 \mu\text{m}$ 로 한정되었다. 그런데 1993년에, R. Syms et al.은  $30 \mu\text{m}$  이상 두께의 졸-겔 실리카막을 실리콘기판 위에 제조하여 광섬유를 직접 접속시킬 수 있는 광도파로의 제조가 가능한 Spin Coating and Rapid Thermal Annealing(SC-RTA) 기술을 개발하였다<sup>[5,6]</sup>. 그들은 최근까지 조성 첨가에 따른 최적 공정조건을 확립하여 광분할기 및 열광학 스위치 등의 PLC 광소자를 제작하였으며 MEMS 소자 등에도 적용하고 있다.

## 3. SC-RTA기술에 의한 졸-겔 실리카막의 제조

졸-겔 실리카막을 점차적인 건조 및 소결없이 스핀코팅(Spin coating) 이후에 Rapid Thermal Annealing(RTA)에 의해 수축응력을 제거하기에 충분한 온도(가열온도)로 즉각 가열하는 공정을 반복하여 균열 생성없이  $30 \mu\text{m}$  이상의 두꺼운 막을 제조할 수 있다. 이 졸-겔 실리카막은 전형적인 에칭 공정에 의해 채널광도파로 PLC를 제조할 수 있는데 자세한 공정은 그림 1에서 나타냈다. 우선 두꺼운 졸-겔 실리카막을 Spin coating에 의해 버퍼층으로 코팅한 후에, 고굴절률의 광도파 코어층을 코팅한다. 제조된 코팅막은 치밀화를 위해 가열온도보다 높은 소결온도로 RTA로 소결한다. 그 이후에 코어층은 건식에칭에 의해 채널광도파로를 형성하고 재용융에 의해 채널을 원형화한다. 최후에 클래딩층도 같은 방법으로 코팅하고 소결시키면 졸-겔 실리카 채널 광도파로가 제조된다.

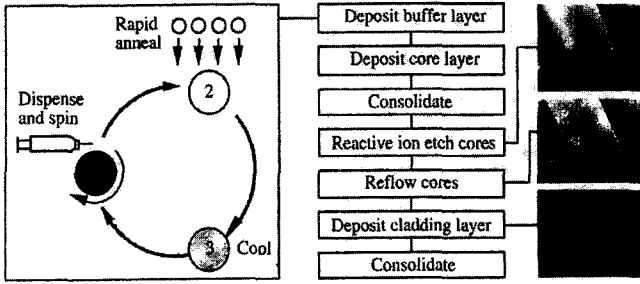


그림 1. 졸-겔 실리카 채널광도파로 제조를 위한 SC-RTA 공정.

졸-겔 실리카 광도파로는 다른 기술에서 제조된 것과 같이  $TiO_2$ ,  $P_2O_5$ ,  $B_2O_3$ ,  $GeO_2$ ,  $Ga_2O_3$ 를 첨가하여 다양한 조성에서 연구되었는데 점차 조성수를 증가시키며 특성을 최적화 하였다. 사용한 졸용액의 출발물질로는 각각 Tetraethyloxsilane (TEOS), Titanium isopropoxide(TPOT), Germanium ethoxide (TEOG), Galliumethoxide 등의 금속 알콕사이드와  $B_2O_3$ 와  $P_2O_5$ 는 산화물 알콜용액을 사용하여 제조하였다. 그림 2는 Germanophosphosilicate glass(GPSG) 졸-용액의 제조방법을 자세히 나타내고 있다. 처음에 TEOS를 알콜에 용해시킨 후에 염산수용액을 첨가하여 70°C에서 2시간 동안 Reflux시켜서 실리카 졸용액을 제조한다. 그 후에 유사한 방법으로 제조한 첨가 산화물들의 졸용액을 차례로 첨가하여 코팅 졸용액 제조를 완성한다. 특히  $GeO_2$  첨가하는 경우 TEOG의 반응성이 뛰어나 제조된 졸은 Molecular sieve를 사용하여 Dephydration시켜서 첨가시켜야 한다. 제조된 졸은 40초간 스핀코팅하여  $O_2$  환경에서 10초간 RTA 가열한다. 이때 단일막의 두께  $T_f$ 는 스핀속도( $\omega$ )와 졸용액 점도에 의해 아래와 같이 결정된다.

$$T_f \approx k(1 - V_a) \omega^{-r}$$

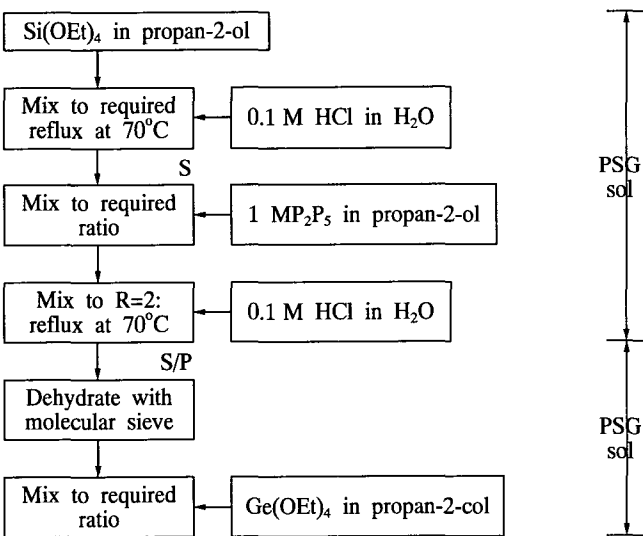


그림 2. Germanophosphosilicate glass(GPSG) 졸용액의 제조방법.

여기서  $k$ 는 상수,  $V_a$ 는 용매의 부피비율,  $r=0.5$ 이다. 이와 같이 코팅되는 2500~5000 Å 두께의 단일막을 여러번 코팅하여 두꺼운 다층막을 제조한다. 이 경우 막의 수축에 의해 막에 인장력이 걸려 균열이 발생되는데, RTA 온도를 증가시키면 실리콘 기판과 유리의 열팽창 차이에 따른 압축력이 작용한다. 따라서 높은 온도에서 압축력에 의한 인장력의 상쇄에 의해 전체 막의 응력의 제거가 가능한데 이때의 온도를  $T_A$ 라 정한다. 그러므로 코팅막에 걸리는 응력에 따라 기판의 곡률이 변화하게 되는데, RTA 가열온도에 따른 기판곡률의 변화를 그림 3에 나타내고 있다. 서냉온도가  $T_A$  이하에서는 인장력이 걸려 기판이 오목하게 변형하고  $T_A$  이상에서는 압축력이 걸려 볼록하게 변형되는 것을 관측할 수 있다. 따라서 정확히  $T_A$ 에서 RTA 가열하게 되면 막에 응력이 없어서 균열 생성없이 두꺼운 막을 제조할 수 있게 된다.

그리하여 가열 후에 발생하는 상온에서의 막의 응력( $\sigma_f$ )은 굴곡된 기판의 곡률을 측정하여 계산할 수 있고 가열하는 동안의 응력( $\sigma_i$ )은 유리막과 실리콘 기판과의 열팽창계수의 차이를 이용하여 평가할 수 있다. 그림 4는 Titaniumsilicate 유리에서 가열온도에 따른  $\sigma_f$ 와  $\sigma_i$ 를 균열이 발생하기 시작하는 막의 두께와 함께 나타낸다<sup>[6]</sup>.  $\sigma_f=0$ 인  $T_{AC}=1000^\circ C$  이하에서는 인장력이, 이상에서는 압축력이 작용한다. 그러나  $\sigma_i$ 는  $T_{AC}=1075^\circ C$

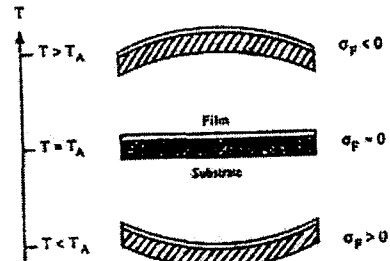


그림 3. 가열온도에 따른 막 응력과 기판 곡률의 변화.

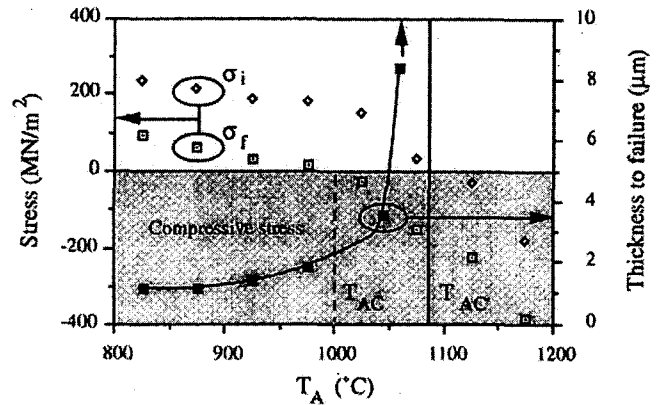


그림 4. Titanium silicate막의 가열온도에 따른 응력 및 균열 발생 막두께의 변화.

까지 인장력이 작용한다. 그리하여 균열없이 제조할 수 있는 막의 두께는  $T_{AC}$ 와  $T_{AC}$  사이의 온도에서 급격히 증가하므로 이 영역 온도의 가열에 의해서 막의 두께를 증가시킬 수 있다. 그러나 Titanium silicate 유리의 경우 높은 온도의 가열 및 냉각의 반복에 의한 기판 변형에 의하여 제조된 막의 두께가 15  $\mu\text{m}$ 로 제한된다. 그리하여  $\text{P}_2\text{O}_5$ 와  $\text{B}_2\text{O}_3$ 의 첨가는 가열온도를 낮추어서 더욱 두꺼운( $\approx 30 \mu\text{m}$ ) 막의 제조를 가능하게 한다<sup>[11,12]</sup>. 그림 5는 Borophosphosilicate 유리(BPSG) 시스템의 조성에 따른 가열 및 재용융 온도의 분포를 나타낸다.  $\text{P}_2\text{O}_5$ 와  $\text{B}_2\text{O}_3$  첨가량을 증가하면 300°C 이상 가열온도를 낮출 수 있고 열팽창계수의 증가에 의한 열응력이 감소하여 두꺼운 막의 제조가 용이해진다. 그러나  $\text{P}_2\text{O}_5$ 의 과량첨가는 수분에 민감해지고  $\text{B}_2\text{O}_3$ 의 과량첨가는 결정상 생성에 의해 불투명해지므로 각각의 첨가량은 10 mol% 이하로 제한된다<sup>[12]</sup>. 그리하여 광도파로 유리의 최적조성 구역은 그림 5에 밝은 부분으로 나타내고 있다.

$\text{P}_2\text{O}_5$ 와  $\text{B}_2\text{O}_3$ 의 첨가는 막의 제조를 용이하게 하지만 굴절률의 증가가 미비하여 광도파로 응용에 제한이 있다. 특히, 굴곡된 광도파로의 굴곡손실은 코아-클래딩의 굴절률 차이  $\Delta n$ 의 증가에 의해 감소되므로 고굴절률 막의 제조가 필요하다. 따라서  $\text{GeO}_2$ 의 첨가에 의하여 막의 굴절률을 증가시킬 수 있다. 그러나 Germanosilicate 유리의 경우,  $\text{GeO}_2$ 의 원료물질인 TEOG의 급격한 반응속도에 의한 불균일한 겔화에 의해 균열이 발생하여 두꺼운 막을 제조할 수 없다. 이에 반해  $\text{P}_2\text{O}_5$ 와 함께 첨가하면 투명한 두꺼운 막의 제조가 가능하여 높은 굴절률을 갖는

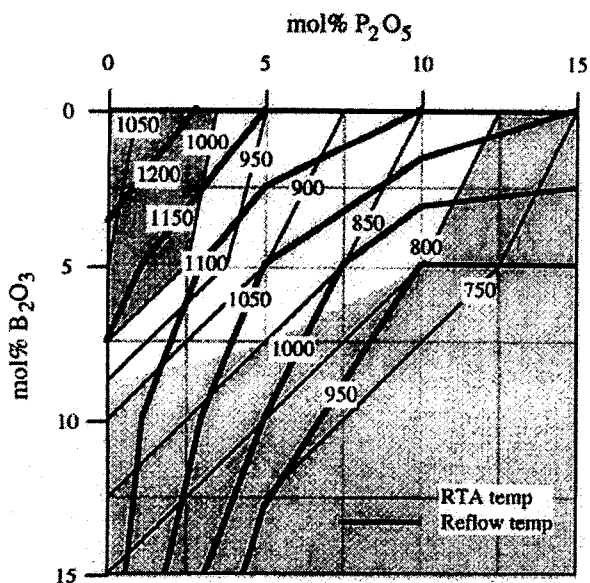


그림 5. Borophosphosilicate glass(BPSG)의 조성에 따른 가열 및 재용융 온도의 분포.

Germanophosphosilicate 유리(GPSG)<sup>[13]</sup>와 Germanoborophosphosilicate 유리(GBPSG)<sup>[14]</sup> 막이 제조되었다. 그리고  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  첨가가  $\text{Er}^{3+}$ -doped 실리카 광도파로의 증폭 Lifetime을 향상하는 것으로 알려져서<sup>[15]</sup>, 최근에는  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ 를 첨가하여 Gallophosphosilicate 유리(GaPSG)와 Gallogermanophosphosilicate 유리(GaGePSG) 막을 제조하였다<sup>[17]</sup>.  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  첨가는 막의 굴절률 및 재용융온도를 많이 증가시켰으며 투명한 유리막 제조를 위한 첨가량이 극히 제한되었다.

#### 4. 졸-겔 실리카 채널 광도파로의 제작

졸-겔 실리카 채널 광도파로는 그림 2에 나타나듯이 버퍼층 코팅 → 코아층 코팅 → 버퍼 및 코아층 치밀화 → 채널 에칭 → 코아 재용융 → 클래딩층 코팅 → 클래딩층 치밀화의 순서로 제작된다. 이때 채널 광도파로 코아는 Cr마스크와 함께  $\text{CHF}_3$ , Ar과  $\text{O}_2$  가스를 사용하는 RIE(Reactive Ion Etching)에 의해 형성한다. 일반적으로 적당한 RF 파워와 압력을 사용하는데  $\text{GeO}_2$ 가 첨가하는 경우 에칭이 되지 않는 Germanosilicate 부산물이 형성되어 Micromasking으로 작용하여서 이를 피하기 위해 높은 파워와 낮은 압력을 사용한다<sup>[14]</sup>. 광도파로 각 층의 조성은 조성의 굴절률과 함께 가열 및 재용융 온도에 따라 정해진다. 이는 코아 재용융시에 버퍼층이 용융되지 않고 클래딩층 치밀화시에 버퍼 및 코아층이 용융되지 않아야 하기 때문이다. 졸-겔 채널광도파로는 Titanium silicate, PSG, BPSG, GPSG와 GBPSG 시스템에서 각각 제조되어 광도파로특성이 평가되었다. 각각의 경우 코아의 폭은 7  $\mu\text{m}$ 이고 코아층의 두께는 시스템에 따라 다르게 적용되었다. 특히, GPSG와 GBPSG 시스템은 버퍼층은 PSG, 코아층은 GPSG 또는 GBPSG, 클래딩층은 BPSG를 사용하여 공정 및 성능의 최적화를 이루었다. Titanium silicate 시스템은 광도파로 손실도 가장 크고(그림 6) TE모드와 TM모드의 광도파 손실 차이도 심하였다. 이는 우선 버퍼층의 두께에 한계가 있어서 기판손실이 크고 불완전한 재용융에 의한 산란이 주원인이 되고 특히 1.39  $\mu\text{m}$  파장에서 심각한  $\text{OH}^-$  흡수를 보였다. 그러나 PSG 시스템인 경우, 가열온도를 낮춰 막두께를 증가시키고 재용융을 향상시켜서 기판 및 산란손실을 감소시키고 특히  $\text{OH}^-$  흡수를 제거하였다(그림 6). 이와 같이 개선된 광도파로특성은 BPSG시스템에서 공정온도의 감소에 의해 더욱 향상되었다. 그리하여 1.525  $\mu\text{m}$  파장에서 편광에 무관하게 0.2 dB/cm의 낮은 광도파 손실을 나타냈다<sup>[12]</sup>. 그러나 PSG와 BPSG시스템은 제조 가능한  $\Delta n$ 이 작고 공정온도가 낮기 때문에 클래딩 치밀화 공정 중에 코아층이 변형되므로 응용에 제한이 있다. 따라서  $\text{GeO}_2$ 가 첨가한 GBPSG

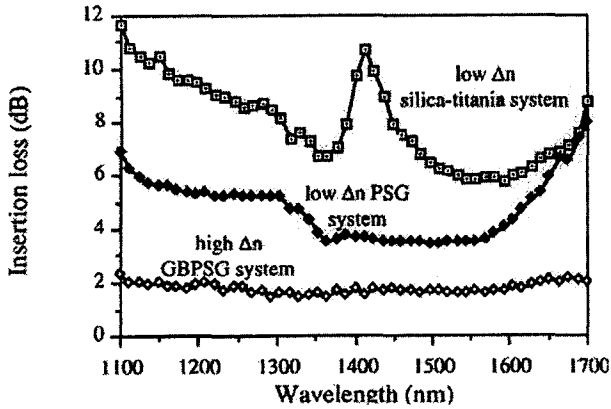


그림 6. 졸-겔 실리카 채널광도파로의 접속손실의 변화.

시스템은 공정온도가 높고 높은  $\Delta n$ 의 제조가 가능하고 파장 및 편광의존성이 없는 낮은 광도파손실을 나타냈다(그림 6).

그림 7은 Titanium silicate, BPSG 및 GBPSG 시스템의 PLC 제조를 위한 공정온도의 변화를 보여주는데 대체로 낮은 공정 온도에 의해 특성이 향상된다. 또한 낮은 공정 온도는 비등방성 에칭에 의한 광섬유 정렬 Groove의 제작을 가능하게 한다. 그리고 그림 7은 또한 PSG 시스템의 8개 단일모드 광섬유 Pig-tail에 의해 패키징된 PLC를 보여주는데 이때 접속손실은  $1.523 \mu\text{m}$  파장에서 1.3 dB/facet을 나타냈다.

코어-클래딩 굴절률 차이  $\Delta n$ 는 광도파로의 굴곡손실에 커다란 영향을 준다. 그림 8은 광도파로의 굴곡정도에 따른 광도파로 손실의 변화를 나타내고 있다. 굴곡이 적은(큰 L)경우에는 굴곡손실 없이  $\Delta n$ 에 따른 광도파손실의 차이가 없는 반면 굴곡이 크면(작은 L) 굴곡손실에 의한 광도파손실이 급격히 증가하지만  $\Delta n$ 이 클수록 그 영향이 줄어든다. 낮은  $\Delta n$  BPSG 시스템을 이용하여  $1 \times N$  광파워분할기를 제작하였다. 그림 9는 분기수에 따른 광접속손실을 나타내고 있는데 분기수의 증가에 따라 접속손실이 증가하고 있다. 낮은  $\Delta n$  시스템에도 불구하고

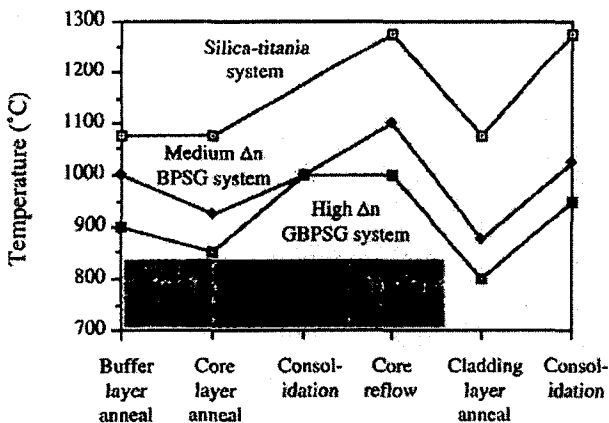


그림 7. 졸-겔 실리카 채널광도파로의 공정별 공정온도의 변화.

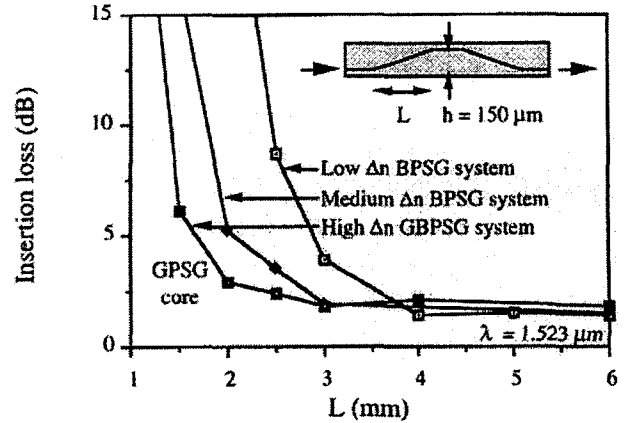


그림 8. 졸-겔 실리카 채널광도파로의 굴곡정도에 따른 접속손실의 변화.

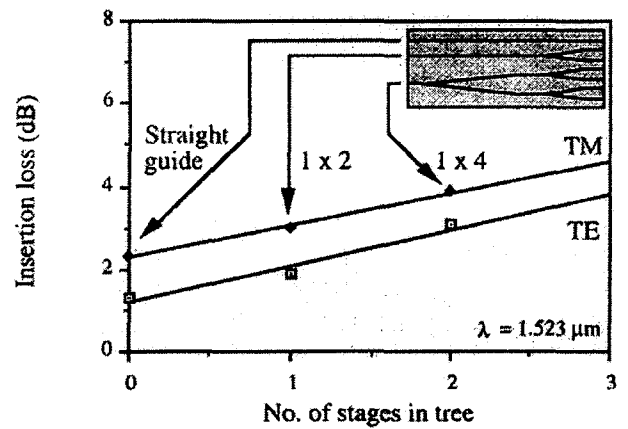


그림 9. 졸-겔 실리카 채널광도파로의 분기수에 따른 접속손실의 변화.

$1 \times 4$  분할기의 경우에도 4 dB 이하의 낮은 접속손실을 보인다. 접속손실과 같은 광소자 특성은 설계 및 공정 개선에 의해 더욱 향상될 수 있어 기존의 실리카 광도파로 제조기술에 상응하는 소자의 제작이 가능하리라 예상된다.

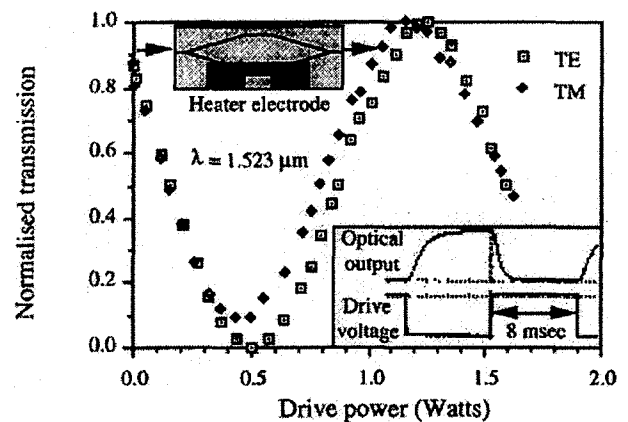


그림 10. 졸-겔 실리카광도파로를 이용한 열광학 Mach-Zehnder 간섭계의 스위칭 특성.

그리고 BPSG 시스템의 열광학 효과를 이용한 Mach-Zender 간섭계 스위치를 제작하였는데 이의 성능을 그림 10에 나타냈다<sup>[12]</sup>. 이 경우 Ti 열전극으로부터 광도파로 모드를 분리시키기 위해 매우 두꺼운 클래딩을 필요로 하였다. 소자 길이 3.4 cm 에서 3.5 dB의 TE모드 접속손실을 보이고 0.5 W 작동파워에서 스위칭 시간은 2~4 msec이다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 졸-겔 실리카 광도파로의 제조와 관련한 연구 내용 및 결과를 소개하였다. 물론 졸-겔 실리카광도파로와 같은 졸-겔 집적광학(Sol-Gel Integrated Optics)의 구현을 위해서는 생산성 확보, 비용 절감, 성능 향상, 집적도 개선 등에 의한 기술의 성숙이 필요하지만 기존 기술의 대체 가능성있는 도전성있는 기술로 평가하고 있다<sup>[17]</sup>. 특히, 본 논문에서 소개한 졸-겔 실리카 광도파로용 SC-RTA 공정의 일관장비가 현재 개발중이어서 실용화 가능성은 더욱 높아지고 있다. 그리하여 본 논문에서 소개한 수동 부품용 실리카광도파로 외에 광증폭기 및 레이저, 비선형 및 스위칭 소자용 광도파로들도 활발히 연구 중이다. 특히 졸-겔 광도파로 관련 연구는 유럽, 캐나다, 호주 등을 중심으로 활발한데 EC의 CAPITAL(Customer Access Photonics and Integrated Technology for Active Low cost Devices) 프로젝트가 대표적이다<sup>[18]</sup>. 그리고 최근에는 졸-겔 공정을 이용한 광경화형 유기물을 실리카에 결합시킨 광경화형 무-유기 하이브리드재료 광도파로의 응용에 대한 연구개발이 활발하다. 이와 같은 졸-겔 광도파로를 이용한 광부품들이 캐나다 Luminon사에 의해서 곧 상용화될 예정이어서 이를 주목하고 있다. 따라서 국내에서도 제조기술이 단순하여서 선진외국과의 경쟁력을 빨리 확보할 수 있는 졸-겔 광도파로에 더욱 관심을 가질 필요가 있다.

## 참고문헌

1. M. Kawachi, "Silica waveguides on silicon and their application to integrated-optic components", *Opt. and Quant. Electr.*, **22**, 391-416 (1990).
2. M. Kawachi, "Recent progress in silica-based planar lightwave circuits on silicon", *IEE Proc. Optoelectron*, **143**, 257-262 (1996).
3. Y. P. Lee and C. H. Henry, "Silica-based optical integrated circuits", *IEE Proc.-Optoelectron*, **143**, 263-280 (1996).

4. S. Valette, "Integrated optics on silicon: IOS technologies", Ch 8 in *Advances in Integrated Optics*, S. Martellucci, A. N. Chester and M. Bertolotti (Eds.), New York, Plenum Press, 1994.
5. A. S. Holmes, R. R. A. Syms, L. Ming, and M. Green, "Fabrication of buried channel waveguides on silicon substrates using spin-on glass", *Appl. Opt.*, **32**, 4916-4921 (1993).
6. R. R. A. Syms and A. S. Holmes, "Deposition of thick silica-titania films on Si substrates", *J. Non-Cryst. Solids*, **170**, 223-233 (1994).
7. R. Ulich and H. P. Weber, "Solution-Doped Thin Film as Passive and Active Light-Guides", *Appl. Opt.*, **11**, 428-434 (1972).
8. R. L. Roncone, L. A. Weller-Brophy, and B. J. J. Zelinski, "Sol-gel synthesis of planar waveguides and integrated components", in *Ultrastructure Processing of Advanced Materials*, D. R. Uhlmann and D. R. Ulrich (Eds.), New York, John Wiley & Sons, 1992.
9. L. Weisenbach, B. J. J. Zelinski, J. O'Kelly, R. L. Roncone, and J. J. Burke, "The influence of processing variables on the optical properties of SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> planar waveguides", *Proc. SPIE*, **1590**, 50-57 (1991).
10. L. Yang, S. S. Saavedra, N. R. Armstrong, and J. Hayes, "Fabrication and characterization of low-loss, sol-gel planar waveguides", *Anal. Chem.*, **66**, 1254-1263 (1994).
11. R. R. A. Syms, V. M. Schneider, W. Huang, and A. S. Holmes, "Low loss achieved in sol-gel based silica-on-silicon integrated optical circuits fabricated by the sol-gel process", *Electr. Lett.*, **31**, 1833-1834 (1995).
12. R. R. A. Syms, W. Huang, and V. Schneider, "Optimisation of borophosphosilicate glass compositions for silica-on-silicon integrated optical circuits fabricated by the sol-gel process", *Electr. Lett.*, **32**, 1233-1234 (1996).
13. R. R. A. Syms, V. M. Schneider, W. Huang, and M. M. Ahmad, "High-Δn silica-on-silicon channel waveguides based on sol-gel germanophosphosilicate glass", *Electr. Lett.*, **33**, 1216-1217 (1997).
14. R. R. A. Syms, V. M. Schneider, W. Huang, and M. M. Ahmad, submitted to *Electr. Lett.*
15. G. D. Maxwell, "Photosensitivity and rare earth doping in flame hydrolysis-deposited planar silica waveguides", *Proc. SPIE*, **2695**, 16-29 (1996).
16. V. M. Schnider and R. R. A. Syms, "Gallium-doped sol-gel glass waveguides on Si substrates by SC-RTA", *Electr. Lett.*, **34**, 1849-1850 (1998).
17. E. M. Yeatman, "Sol-gel fabrication for optical communication components: prospects and progress", *Sol-Gel and Polymr Photonic Devices*, *SPIE Crit. Rev. Proc.*, **CR68**, 1-24 (1997).
18. Web site, <http://www.intec.rug.ac.be/Reseach/Projects/horizon/projects>.