실리카 광도파로 소자

이 형 종
전남대학교 물리학과 교수

1. 서 론

실리카 광도파로 소자는 실리콘과 같은 평면의 기판상에 광의 분지, 결합, 반사, 터널링, 위상변조, 브래그반사, 레이징 또는 증폭 등의 여러가지 단위기능을 수행할 수 있는 실리카 도파로의 요소 소자들과 이들을 연결하는 광도파로들로서 광신호의 전송, 파장채널 선택 및 삽입, 스위칭, 필터링, 광감지 및 계측 등의 다양한 목적 기능을 수행할 수 있는 광회로 망을 구성하여 광섬유와 같은 광전송매체로부터 오는 광신호를 실리카 광도파로 소자라는 단일 칩 안에서 종합적으로 처리하게 하는 집적광학 소자이다. 이같은 집적광학소자는 광전변환없이 초고속 대용량의 광신호를 처리할수 있다는 고유의 장점으로 말미암아 근래에 초고속 광전송 및 광신호처리 등의 광통신에 중요한 역할을 하게되었다.

이와같이 집적화한 형태의 실리카 도파로 소자는 기존의 광학대위의 광학계 또는 광섬유소자들로 복잡하게 구성된 광학계를 팩키지화한 칩 형태의 모듈로 제공함으로서 여러 용도에 공통적으로 사용할 수 있게 해준다. 또한, 광학계가 기계적 진동이나 정렬 등에 무관하게하여 소자의 사용에 신뢰성을 부여하며, 소자의 제작에 반도체 공정 등을 이용함으로 저가격 및 양산화를 가능케하여 상용화의 길을 열어준다. 특히 실리카계 유리를 도파로의 재료로 사용하므로서 광도파로의 전파손실과 광섬유로의 접속손실을 최소화할 수 있고, 실리카의 우수한 재질 안정성 및 환경 내구성을 이용할 수 있어서 최근 상용화되고있는 파장 다중화(WDM; wavelength division multiplexing), 광가입자 망(FTTH; fiber to the home) 등의 광통신 시스템에서 실용적인 소자로서 응용되기 시작하였다.

실리카 도파로소자의 기판으로는 실리카 기판이 사용되는 경우도 있으나 주로 실리콘 기판이 사용된다. 실리카 도파로소자에 실리콘 기판을 사용하므로써 기존의 잘 개발된 실리콘 전자소자의 제작공정을 그대로 적용하여 신뢰성있는 소자제작을 할 수 있으며, 실리콘을 산화시킨 산화막을 도파로 기저층으로 이용할 수 있고, 실리콘 기판 결정면을 비등방성 식각하여 기판 위에 실리콘 V홈을 제작하고 이를 광섬유 접속에 이용하거나 V홈 식각면을 반사면으로 이용하여 도파로끝과 광검출기간의 광결합에 이용할 수 있으며, 실리콘의 큰 열전도율을 이용하여 레이저, 전자구동소자 등의 다른 전자소자들을 효율적으로 방열할 수 있어서 광 및 전자소자들의 하이브리드 패키징을 가능하게 해준다. 이같은 장점으로 인하여 여러 집적광학의 재료 가운데서도 실리콘을 기판으로하는 실리카 도파로 소자가 먼저 광통신에 실용화의 가능성을 열어주게 되었다.

이 글에서는 이와같은 응용상 및 재료 특성상의 여러 가지 장점을 갖는 실리콘을 기판으로하는 실리카 도파로의 박막이나 도파로의 제작공정과 지금까지의 실리카 도파로 소자들의 개발현황 그리고 현재 소자들의 문제점 및 향후 발전방향 등을 논의해보기로 한다.

2. 실리카 광도파로 소자의 제작

도파로 소자에 필요한 박막은 보통 도파로 코어에 수 미크론, 그리고 도파로 기저 및 상부 클래딩에 20-30 미크론 정도이다. 이같이 박막이 두꺼운 이유는 도파로가 궁극적으로 광섬유와 연결되어야 하므로 광섬유와의 모드정합을 이루도록 하기 위해서이다. 실리카 후막의 제작법은 1980년경 NTT에서 FHD (Flame Hydrolysis Deposition; 화염가수분해 증착법) 방법을 연구하기 시작한 이래로 AT&T 및 LETI에서 실리콘 소자기술에서 사용하던

CVD (Chemical Vapor Deposition) 방법을 이용하는 연구가 발전되어 왔었다.

FHD 방법은 광섬유 기술에서 개발된 VAD (Vapor Phase Axial Deposition) 기술을 바탕으로 이를 실리콘 기판에 적용한 방법으로서 증착속도가 1㎛/min 또는 그 이상으로서 수십㎛의 두께를 요하는 실리카 광도파로의 제작에 효율적인 방법으로 고속의 후막증착이 가능하다. 반면, CVD방법은 실리콘 전자소자 기술을 기반으로 하며 LPCVD (Low Pressure CVD)나 PECVD (Plasma Enhanced CVD) 방법이 주로 사용된다. CVD 방법은 반응기 내의 온도와 유량이 잘 정의된 준평형 표면 화학반응과정을 통하여 반응기체들이 분자단위로 증착되므로, 온도와 유량이 잘 정의되지 않는 비평형 상태의 산수소 화염 속에서 반응기체들이 응결하여 (precipitation) 생기는 그을음 (soot)을 증착시키는 방법인 FHD에 비하여, 매우 양질의 도파로 재료를 만들 수 있다. 반면에 CVD 과정은 기체분자들이 먼저 표면에 흡착되어 반응한 후에 다시 반응잔여물이 탈착되는 과정으로 진행되므로 증착속도가 기체분자들의 이송속도(transport rate)와 반응속도(reaction rate)에 의하여 결정되며, 따라서 증착률이 LPCVD의 경우에는 분당 100Å 그리고 PECVD의 경우 1000Å 정도로서 낮은 것이 단점이다.

그러나 CVD방법은 이같은 낮은 증착률을 갖는 반면 공정 1회당 웨이퍼를 최고 100여장에 이르는 배치작업을 할 수 있는 장점도 있어서 FHD와 경쟁기술을 이루고 있다. 최근에 CVD의 증착속도를 높이기 위하여, 오존CVD, PECVD 등의 O_3나 플라즈마 등의 분자 활성화 방법에 의해 반응속도를 높이는 방법과, 반응기체를 노즐을 이용하여 분사함으로서 기체분자의 이송속도를 높여서 증착률을 향상시키는 방법이 연구되고 있다. 그림 1은 LPCVD 방법에 의한 실리카 BPSG막의 증착장치 개략도를 나타낸다.

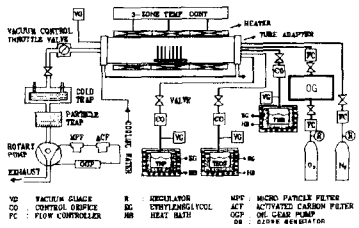

그림 1. LPCVD 방법에 의한 실리카 박막의 증착장치.

실리카 도파로 유리박막의 주요 조성은 BPSG (Borophosphosilicate Glass)이다. BPSG의 굴절률은 P함량에 따라 증가하고, B함량에 따라 미량 감소한다. CVD 실리카 기술에서는 BPSG가 주로 사용되며 P의 함량으로 굴절률을 제어한다. 그러나 최근 245nm UV광에 의한 Ge의 광굴절 효과가 광섬유 분산보상기 및 WDM 실리카 도파로소자 등에 응용되기 시작하면서 Ge-BPSG 박막이 LPCVD법에 의해서도 Lucent 사의 Allan Bruce등에 의하여 연구되고 있다.

FHD 실리카 기술에는 Ge-BPSG 또는 Ti-BPSG 박막이 주로 사용되어 왔었다. 그러나 Ti를 첨가할 경우 광손실이 다소 더 크다고 알려지면서 최근에는 Ti이 없이 주로 Ge의 도우핑 만으로 굴절률을 제어하고있다. FHD법은 $SiCl_4$, $GeCl_4$ 등의 할로겐 화합물 기체재료들을 H_2와 O_2의 수증기 화염속에 흘려넣어 H_2O와 가수분해 반응을 (hydrolysis reaction) 시키고 화염 내부에서 100-1000Å 크기의 미세한 SiO_2가루 (Soot)를 생성시킨 다음, 이를 기체흐름과 열영동(thermophoresis) 에 의해 실리콘 기판에 적당한 두께로 균일하게 부착시켜 1300℃ 전후의 온도에 녹여 투명한 균질의 도파 유리 막으로 만들어주는 고밀화 (Consolidation) 공정을 거쳐서 만들어진다. 여기서 도판트인 B와 P는 BCl_3와 $POCl_3$을 주로 사용하며 주로 증착된 실리카 입자의 융점을 낮게하기 위하여 첨가하나 박막조직의 거칠기를 줄여서 도파박막의 산란손실을 제거해주는 역할을 하기도 한다. 일반적으로 FHD법은 산수소 불꽃 내의 기체상 반응으로서 온도나 반응물의 공급유량 등의 중요 공정변수가 화염 내에서 균일하게 정의될수 없고 또한 증착표면과 온도차가 커서 독립적인 공정변수를 추출해 내기가 어렵다. 그 결과 고밀화 공정후의 박막의 표면특성이나 박막내의 결정상의 생성이 불꽃의 높이, 산수소 유량, 반응후 기체의 배출속도 등에 크게 좌우된다.

FHD방법에 의해 실리콘 기판에 실리카 막을 만들때는 기판의 한쪽 면에 수십 미크론의 실리카 입자층을 쌓고 높은 온도에서 고밀화 열처리를 하기 때문에 실리콘 기판과 실리카 박막의 열팽창 차이로 인하여 응력에 의한 기판의 휨변형이 생긴다. 그리고 실리콘을 기판으로 (융점이 1415℃ 부근임) 사용하기 때문에 1350℃ 이상의 고밀화 공정 온도에서는 기판의 변형이 쉽게 일어난다. 보통 500미크론 내외 두께의 4-5인치 실리콘 기판에 실리카층을 20-30 미크론 쌓으면 웨이퍼 중앙의 휨변형의 정도는 500미크론에 달한다. 이와같은 웨이퍼의 변형은 도파로의 사진식각 공정에서 마스크와 기판의 비접착, 광섬유와의 접합 팩키징과정에서 정렬오차 등의

여러가지 문제가 발생하며 이를 줄이기 위하여 1mm 이상의 두꺼운 실리콘 기판을 사용하는 것이 일반화 되어있다. 반면에 CVD공정에서는 증착온도가 800℃ 이하로서 낮고 또한 LPCVD의 경우 실리카 박막이 기판의 양면에서 증착이 되므로 기판의 뒤틀림은 다소 있으나 실리카막과 기판의 응력이 기판 양면에서 상쇄되어 기판의 휨 변형이 적고 따라서 도파로 패턴의 사진식각을 위한 노광공정에 FHD 방법에 비하여 유리하다.

FHD에 의한 실리카 도파로 제작은 그림 2과 같다. 실리콘 기판

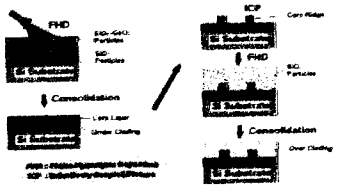

그림 2. FHD에 의한 실리카 도파로 제작방법의 개략.

에 FHD 방법으로 기저 실리카층과 도파로 코어층을 증착하고 그 위에 식각보호층으로 알루미늄이나 크롬 또는 실리콘 층을 증착한다. 다음으로 감광막을 도포하고 포토마스크를 이용하여 도파로의 패턴을 감광막에 전사한 다음, 이를 식각보호층에 습식 또는 건식 식각법으로 전사한다. 그 다음 식각보호층의 패턴을 활성이온 식각법(reactive ion etching)이나 유도결합 플라즈마 식각법 (inductively coupled plasma etching)으로 도파로의 코어층에 에칭하여 전사하고 표면세척을 한다. 마지막으로 식각된 도파로의 형상 위에 FHD 방법으로 윗 덮개층을 씌워 실리카 도파로의 제작을 끝낸다. 이상 실리카층의 각 공정에서는 하부에 있는 실리카층일수록 유리의 연화온도(softening temperature)가 높아야 한다. 이같은 각 층별 연화온도의 차는 박막의 순차적 공정과정에서 도파로 패턴의 움직임을 막을 수 있다.

실리카 도파로 소자의 기판으로서 실리콘 대신에 실리카를 사용할 수도 있다. 이 경우 실리카 도파로가 동일한 재질인 실리카 기판 위에 있으므로 서로간 응력이 없고 따라서 도파로의 복굴절이 없으며, 기저층이 없이 도파로 코어를 기판에 바로 증착할 수 있다는 장점이 있다. 반면에 기판이 비정질이므로 결정질인 실리콘 기판과는 달리 그 특성상 1200℃부터 기판의 견고성이 급격히 감소하여 변형이 일어나기 시작하고, 박막 각 층간에 열팽창계수가 다를 경우 계면에서 쉽게 균열이 일어나기 때문에 제작시 공정조건의 폭이 좁은 단점이 있다.

3. 광도파로의 특성

표 1은 자주 사용되는 도파로의 대표적 규격이다. 낮은 Δ 도파로는 Δ 값이 광섬유와 거의 같아 광섬유와 모드결합효율이 좋으며, 도파로의 휨이 있을 경우 광손실이 커서 광분지기나 WDM 커플러과 같은 거의 직선에 구조의 도파로소자의 경우 자주 사용된다. 높은 Δ 도파로는 광섬유와 접속손실은 다소 있더라도 도파로의 휨에 따른 광손실을 줄이기 위하여 Δ 값을 증가시킨 구조로서 비대칭 간섭기, WDM 소자 또는 8x8 광스위치 배열 등의 도파로 휨이 크고 중급 집적도를 갖는 정밀한 도파로의 경우에 주로 사용되는 도파로이다. 현재까지는 낮은 Δ와 높은 Δ의 두가지가 주로 사용되며, Δ값이 1이상의 도파로는 아직까지 많은 연구가 되고 있는 것은 아니지만 향후 16x16 광스위치 배열 (256개 대칭성 간섭기가 사용됨) 등의 고집적도를 요하는 도파로소자에 사용되리라 기대되는 도파로로서 많은 연구가 되리라 된다. 이 경우 광섬유와의 모드 결합효율이 떨어지게 되므로 이를 개선하기 위한 모드변환도파로 소자가 필요할 것으로 기대된다.

표 3. SiO_2-GeO_2도파로의 대표 규격.

Waveguide type	low Δ	mid Δ	high Δ	super high Δ
Δ (%)	0.25	0.45	0.75	1.5-2.0
Core size(μm)	8×8	7×7	6×6	4.5, 3×
Loss(dB/cm)	<0.1	<0.1	<0.1	0.1
Fiber coupling (dB/pt)*	<0.1	0.1	0.5	2
Bending radius(mm)**	25	15	5	2

*Index oil과 일반단일모드 광섬유사용
**Bend loss in a 90° arc waveguide is less than 0.1 dB at λ=1.55μm

실리콘 기판위의 도파로는 실리콘 기판위에 수십미크론에 이르는 후막속에 묻혀있다. 따라서 실리콘 기판과 실리카 박막의 열팽창 차이에 의하여 도파로의 응력과 변형이 생기며, 이와같은 비등방적인 박막의 응력에 의하여 실리카 박막 내에는 복굴절이 생기게 된다. 보통 그 크기는 $5x10^{-4}$ 정도로서 파장 정밀도가 nm정도를 요하는 소자들의 경우 이 효과는 신호의 cross-talk로 작용하여 통신상에 매우 심각한 문제를 일으킨다. 이같은 효과를 제거하는 방법으로는 도파로의 2-3미크론 하부에 실리콘 질화막과 같은 고굴절률 층을 수십 nm정도 두께로 두어 TE와 TM의 유효굴절률을 서로 다르게 변화시키거나, 실리카

도파소자의 상부 피복층 위에 실리콘 막을 두어 응력을 가하거나 또는 실리카 도파로 주변에 깊은 홈를 파서 인장응력을 차단시켜주는 방법들이 고안되었다. 이러한 방법들은 도파로소자의 트리밍, 마스킹 또는 식각 등의 부가적인 마스크 공정이나 박막공정을 필요로 하는 것이어서 소자제작의 신뢰성을 떨어뜨리고 도파로의 다른 특성들의 제어에 영향을 주게된다.

이와같은 도파로의 복굴절과 관련된 문제를 해결하기 위하여 최근 에어로졸 화염증착법이 개발되었다. 이 방법은 용액상의 재료를 가지고 증착하는 방법으로서 증기압이 낮은 Na계의 금속 및 알칼리토금속을 쉽게 실리카재료박막에 넣을 수 있어서 지금까지 CVD나 FHD 방법에 의하여 제작할 수 없었던 Pyrex (Na_2O-B_2O_3-SiO_2-Al_2O_3)계의 유리박막의 제작이 가능하게 되었다. Pyrex는 열팽창률이 Si의 열팽창률과 같아 박막의 휨이나 응력이 전혀 생기지 않으며 이와같은 Pyrex재료를 이용하여 복굴절이 없는 도파로의 제작이 가능하여 향후 연구결과가 주목되고 있다. 현재로서는 Na를 포함하는 실리카 재료의 건식식각률이 낮아서 도파로의 제작에는 다소 어려움이 있으나 도파로의 식각을 얇게하고 Δ 치를 크게하여 도파로로서 사용할 수 있으며, 모드변환기 또는 다른 패턴닝의 방법 개발여하에 따라 사각형의 채널도파로와 접합도 가능할수 있으리라 본다. 그리고 이 재료는 희토류 재료 즉 Er, Nd, Yb 등의 용해도가 커서 고이득률의 증폭기용 도파로를 만들 수도 있으며 이상의 희토류 재료 역시 에어로졸 방법에 의하여 쉽게 재료에 도우핑 할 수 있는 장점이 있다.

4. 실리카 도파로소자들

광회로의 다양한 기능들은 광을 분지하고 각 분지된 광에 위상차를 준 다음 다시 이들을 결합하게 함으로서 얻어진다. 이같은 기능을 수행하게 하는 기본 단위는 Y-분지기와 커플러 등이며 MZ (Mach-Zender) 간섭기, 1xN 또는 2xN 광분할기 등도 이와같은 기본 구조로 이루어 진다. 그림 3는 이러한 단위소자 및 이들로 구성되는 기본 소자들을 보여준다. MZ 간섭기는 두 간섭 팔(arm)을 대칭 또는 비대칭으로 만들 수 있으며 대칭일 경우는 그 특성이 파장에 무관하게 동작하는 파장무관 위상간섭기가 되며, 비대칭일 경우는 두 팔간의 광로차에 따라 파장 투과특성이 달라지며 파장무관 1.3/1.5μm 2x2 광분할기, 1.3/1.5μm WDM 커플러, FDM 필터 등을 경로차를 조절하여 다양하게 만들 수 있다(그림 4).

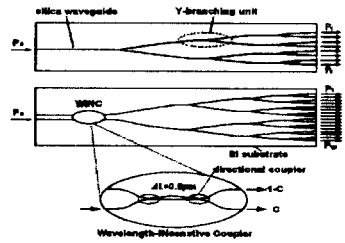

그림 3. 광분지기와 커플러를 이용한 광분할기.

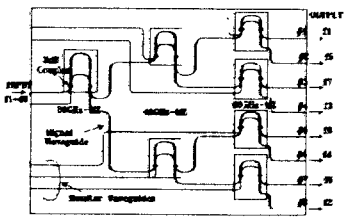

그림 4. MZ 간섭기를 이용한 주파수 필터.

위와 같은 단위소자를 더욱 집적화하면 새로운 기능을 가진 집적도가 높은 소자들 즉 NxN 광스위치, programmerble delay line 이나 시간상의 신호 패턴을 구별해 낼수 있는 transversal 필터, 광분산 제어용 lattice 필터, 주파수 변별기등을 만들 수 있다. 이들 간섭형 광소자에서 경로차의 조절에는 실리카의 열광학효과를 이용한다. 여기서 실리콘 기판은 좋은 열도체로서 열광학 소자의 안정적 작동을 도와준다. 이들 소자를 보다 빠른 속도으로 동작시키고 전력손실을 줄이기 위해 Si 기판을 국부적으로 식각하여 bridge같은 구조로 고립시켜 열용량을 줄일 수도 있으며 스위칭 속도는 보통 1 ms 내외다.

채널도파로는 그 구조상 1차원적인 선을 따라 광이 이송되는 특징을 갖는다. 따라서 광신호를 공간적으로 병렬 처리하도록 할 수 없을뿐 아니라 광의 다중간섭을 유도하기 어려워서 파장필터 소자의 경우 파장선택성을 높일수 없다. 이러한 구조상의 단점은 평판슬랩 (slab)을 써서 보완할 수 있다. NxN 스타 커플러와 Arrayed Waveguide Grating (AWG)는 슬랩도파로를 이용하여 광의 병렬처리 또는 다중간섭을 일으키는 소자이다. 우선 NxN 스타커플러는 채널 도파로의 도파모드를 도파로 진행의 횡방향으로 전파할수 있는 슬랩 도파로로 변환시켜 도파모드의 회절을 일으키고 다시 N개의 채널도파로로 광파면의 분할하여 광신호의 NxN 연결을 하는 소자이다. 따라서 N이 클 경우 매우 효율적으로 광을 분할할 수 있다. 그리고 AWG는 위의 스타커플러 2개를 각각 위상이 일정한 차이를 갖는 N개의 도파로로 연결함으로서 1개의 채널도파로 광을 N개

채널도파로로 나누고 각각 도파로가 일정한 경로차를 갖도록 한 다음 다시 N개의 채널도파로하여 grating 광학소자와 같은 역할을 유도한 소자이다. 특히 도파로를 이용하기 때문에 도파로간 위상차를 크게 할수 있어 공간광학적으로는 얻을 수 없는 수백차수 회절차수를 갖도록하여 결과적으로 고분해능을 갖게하는 소자이다(그림 5).

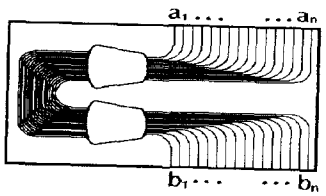

그림 5. AWG 파장필터.

도파로 공진소자로는 원 또는 Bragg 격자 공진기가 있으며 그 구성은 그림 6와 같다. 원 공진기는 폐곡선 루프의 도파로를 구성하여 만들고, 격자 공진기는 직선 도파로의 양단에 브래그격자를 놓아서 만든다. 이때 격자는 홀로그램 사진식각과 건식식각에 의하여 만들거나 UV광을 Ge-Silica계의 도파로에 쪼여 만들 수도 있다. 그러나 UV 조사에 대한 도파로의 굴절률 변화는 도파로 도판트, 조사광의 파장 등에 따라서 크게 달라지므로 앞으로 많은 연구가 이루어져야 할 분야이기도 하다. Bragg 격자 공진기는 AWG와 마찬가지로 다중간섭을 이용하므로 분광분해능이 높고 단순하면서도 AWG에 비하여 소자의 집적도가 크다. 그러나 채널도파로를 직렬로 이용하므로 N개의 WDM 다중채널을 순차적으로 분광하며 따라서 채널수에 따라 광경로가 길어지고 광손실이 누적되는 단점이 있다. 따라서 이같은 형태의 소자는 채널수가 적어도 되는 가입자 광통신망 등에 쓰일 수 있을 것으로 기대된다.

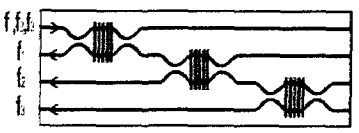

그림 6. 브래그 파장필터.

5. 전망 및 결론

지금까지 실리카 도파로소자의 기술현황과 제작법 및 개발소자들을 살펴보았다. 실리카 소자는 현재 광분할기, 커플러 등의 소자들이 광통신 및 기타 현장에서 쓰이고 있으며, AWG, WDM/FDM 필터 등의 소자는 앞으로 다가올 초고속 광전송 및 가입자 망에서의 핵심부품으로 자리를 잡아가고 있다. 그리고 재질의 기능성 면에서도 Er 재료를 이용한 증폭 및 레이저 기술, UV-writing 및 전기폴링에 의한 EO 효과의 유도 등이 연구되고 있다. 그러나 아직 실리카소자 팩키징 기술은 미흡하여 양산공정화에 어려움이 있으며 발광 및 수광소자의 집적화기술의 고급화가 필요하다. 최근 SiOB (silicon optical bench)기술은 실리카 도파로, 발광 및 수광소자들을 포함하는 패키징기술로 발전하고 있으며 그 기술전망이 밝다. 실리카 기술은 지난 15년간의 기술개발기를 거쳐 이제 동기술의 활용 및 도약단계에 이른 것으로 생각된다. 동 분야의 기술이 재료, 공정, 측정, 설계 등의 여러분야의 기술을 종합적으로 필요하고 있다. 따라서 국내에서도 서로 유기적 협력을 통한 발전이 필요하며 한국이 세계적으로 경쟁력있는 동 분야의 기술을 확보할수 있기를 기대한다.

참 고 문 헌

1. M. Kawachi, "Integrated Silica Waveguide Technology", OFC '96 Tutorial (1996); "Silica Waveguides on Silicon and their application to Integrated Optic Components", Optical and Quant. Electronics 22, 391-416 (1990).
2. Optical Fiber Telecommunications IIIB, edited by Ivan P. Kaminow, Chapter 8 Silicon Optical Bench Waveguide Technology,1997 Academic Press, San Diego.
3. S. Valette, et.al., "Si-Based Integrated Optics Technologies", Solid State Technology 32(2), 69 (1989).
4. C. H. Henry, et.al., "Glass Waveguides on Silicon for Hybrid Optical Packaging", J. of Lightwave Technol. 7(10), 1530 (1989).

<정 영철 위원>