

굴절을 정합액을 이용한 실리카 슬랩도파로의 전송손실 측정

성희경 · 박상호 · 신장욱 · 심재기
 한국전자통신연구원 실리카광부품팀

(1998년 10월 19일 받음, 1999년 3월 5일 수정본 받음)

FHD (Flame Hydrolysis Deposition) 공정으로 실리카 슬랩도파로를 제작하고 전송손실을 측정하였다. 전송손실 측정에는 프리즘커플링으로 빛을 입사시키고 굴절률 정합액으로 출사시키는 장치를 제작 사용하였다. 측정된 전송손실은 1300 nm 및 633 nm 에서 각각 0.04 dB/cm 및 0.09 dB/cm의 값을 보였다.

I. 서 론

광통신에서 많이 사용되는 광분리기, 파장다중 소자(WDM) 등은 현재 광섬유 융착형이 주로 사용되고 있으며 이들은 주로 4 분기 이하의 저차수 분기나 1.31 μm/1.55 μm 파장다중 소자에 국한되어 사용되고 있다. 그러나 100 Gbps 이상의 대용량 광통신이 요구됨에 따라 다분기 광분리기나 DWDM (Dense WDM) 같은 다채널 광소자가 요구되고 있다. 광섬유 융착형 광소자는 공정의 특성상 다분기나 DWDM 소자의 제작에는 제작공정이 까다롭고 부피가 커지는 문제가 있다. 다분기 다채널 소자의 광회로를 집적화 시키는 기술은 PLC(Planar Lightwave Circuit)라 하여 도파로를 평면 기판상에 구현하는 것으로서 반도체, 실리카, 폴리머 등 다양한 소재로 제작할 수 있으며 실리카의 경우 광섬유와 유사한 재질로서 낮은 전송손실, 저접속 손실 등의 장점이 있으며 중장기적으로는 각종 능동소자 및 수동 광소자가 단일 기판상에 구현되는 하이브리드 집적회로 기술에 유리하다.

평면도파로 광소자의 기본구조는 언더클래드와 코어로 이루어진 슬랩도파로인데 채널도파로를 제작하기 전에 슬랩도파로 상태에서 박막의 손실특성을 시험하여 박막 형성공정과 연관시켜 좋은 품질의 박막을 제작하여야 하므로 슬랩도파로의 광전송 손실을 측정하여야 한다. 광도파로의 전송손실은 다음과 같이 표현된다.

$$\alpha = \frac{10 \log(P_0/P_1)}{z_1 - z_0} \text{ (dB/cm)} \quad (1)$$

여기에서 z 는 도파로의 광로상의 임의의 지점이며 P 는 그 지점에서의 광도이다.

슬랩도파로의 손실측정을 위해서는 광경로상의 여러 지점에서의 광도를 측정하여야 하며 이를 위하여 슬랩도파로에 광을 입력시키고 또한 도파로의 임의의 지점에서 출력시켜야 한다. 광도의 측정을 위하여 광을 출력시키는 방법에 따라 손실측정법을 분류할 수 있는데 이에선 절단법,^[1,2] 산란법,^[3,4] 프리즘 커플링법^[5] 등이 있다. 절단법은 도파로를 절단하면서 단면으로 출사되는 광도를 측정하는 방법으로 광섬유의 전송

손실을 측정할 때 유용한 방법이나 기판상의 슬랩도파로를 절단하면서 광도변화를 측정하는 것은 대단히 어렵고 정확도가 떨어지며 시편을 파괴하여야 하는 문제가 있어 기판상의 슬랩도파로 손실측정에는 적당하지 않다. 산란법은 빛이 진행하면서 도파로 외부로 산란되어 나오는 광파위를 카메라나 광섬유 팁으로 위치에 따라 측정하여 그 광도변화로 부터 손실계수를 계산하는 방법인데 기본적으로 도파로에서 산란되어 나오는 빛을 측정하는 것으로서 실리카 도파로와 같이 산란이 적은 고품질의 도파로의 손실을 측정하기는 어렵다. 프리즘 커플링법은 프리즘을 도파막에 접촉시켜 빛을 출사시키는 방법으로 프리즘과 박막의 접촉점을 이동시키면서 프리즘을 통하여 출사되는 광파위의 변화를 측정하는 방법이나 프리즘을 이동하면서 일정한 결합률을 유지하기 힘들다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 3 개의 프리즘을 사용하는 방법이 제안되었으나,^[6] 실제로 임의의 점에서 광을 출사 시키기 위하여 프리즘을 이동할 때 입력용 프리즘의 결합률을 일정하게 유지하기 힘들고 복잡한 메커니즘이 필요하여 측정이 까다롭다. 표 1에 슬랩도파로의 손실 측정방법별 광입사 및 출사 방법을 비교 정리하였다.

II. 측정원리

본 연구에서는 Teng^[7]에 의하여 제안된 굴절률 정합액 장치를 제작하여 실리카 슬랩도파로의 손실을 측정하였다. 이 방법은 슬랩도파로를 도파로의 코아보다 굴절률이 큰 액체에 비스듬히 담그면 도파로를 진행하던 광파가 액체로 빠져나오는 원리를 이용하여 도파로의 임의의 지점에서 빛을 출사시

표 1. 측정방법별 광입사 및 출사방법

측정방법	광입사	광출사
절단법	프리즘	단면
2-프리즘	프리즘	프리즘
3-프리즘	프리즘	프리즘 or 단면
산란측정	프리즘 or 단면	산란광
굴절률정합액	프리즘	굴절률정합액

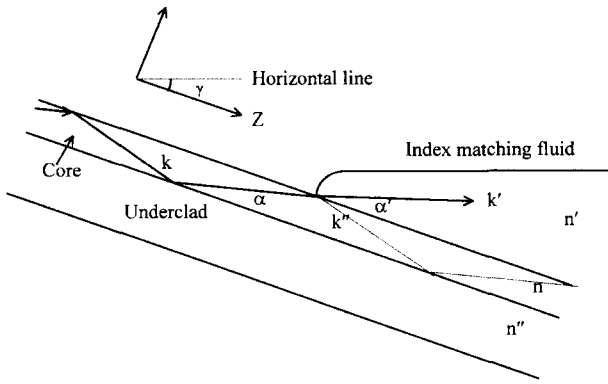


그림 1. 굴절률 정합액에 의한 슬랩도파로에서의 빛의 출사.

키는 방법으로서 도파로상의 광도변화를 연속적으로 측정할 수 있어 손실이 0.1 dB/cm 이하인 고품질의 박막측정에 적합한 것으로 알려져 있다. 그림 1에 굴절률 정합액에 의하여 슬랩도파로에서 빛이 출사하는 모습을 보였다. 슬랩도파로는 굴절률 정합액에 각도 γ 를 이루며 담겨 있는데 굴절률 정합액의 굴절률 n' 은 슬랩의 코아부의 굴절률 n 보다 수 % 높은 것을 사용하면 된다. 슬랩도파로의 도파광은 전파상수 k 의 평면파로 볼 수 있고, 도파로의 코아부에서 여러번 전반사를 하면서 진행한다. 도파광의 전파상수 k 는 도파로와 α 의 각도를 이루고 있는데 이 각도는 코아의 굴절률 n , 클래드의 굴절률 n' , 레이저의 파장, 코아부의 두께, 도파광의 모드차수 및 모드 특성 (TE 또는 TM)에 따라 결정된다. 도파로를 진행하던 광파는 굴절률 정합액의 표면과 도파로 표면과의 경계선에서 전파상수 k 로 정합액으로 빠져 나오게 되는데 이때 도파로와 k' 이 이루는 각은 Snell의 법칙 $n \cos \alpha = n' \cos \alpha'$ 에 의하여 이 된다. 이때 일부 광은 경계에서 반사되어 다시 도파로내로 전파상수 k' 으로 들어갔다가 코아와 클래드의 경계에서 반사되어 나와서 정합액으로 역시 k 의 전파상수로 나오게 되는데 이러한 과정이 반복되면서 결국 100%의 도파광이 정합액으로 빠져 나오게 된다. 이러한 상태에서 슬랩도파로를 Z 방향으로 정합액 속으로 진행시키면 슬랩도파로의 위치에 따른 도파광의 광도를 연속적으로 측정하여 식 (1)에 의해 손실계수를 얻을 수 있다.

III. 실험방법

3.1. 실리카 슬랩도파로 제작

실리카막은 FHD (Flame Hydrolysis Deposition) 공정에 의하여 제작하였다. FHD 공정에 의한 실리카막 제조방법에서는 산소와 수소에 의한 화염에 연화물 원료를 공급하여 열분해 반응을 동반한 가수분해를 일으켜 산화물 미립자를 형성하며, 본 실험에서는 실리콘 기판상에 실리카 미립자를 형성하였다. 연화물 원료로는 SiCl_4 를 주원료로 사용하고 Ge, B, P의 원료로는 각각 GeCl_4 , BCl_3 , POCl_3 를 사용하였다. 기판 위에 형성된 실리카 미립자는 전기로에서 1300°C 근처의 온도로 열처리하여 투명한 실리카막을 형성하였다.^[8] 슬랩도파로는 먼저 실리콘 기판에 클래드용 실리카막을 형성하고 그

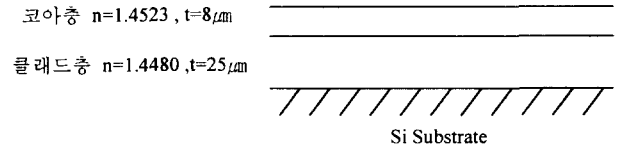


그림 2. 실리카 슬랩도파로의 구조.

위에 다시 코아용 실리카막을 형성하여 제작하였다. 클래드층의 두께는 25 μm , 굴절률은 1550 nm에서 1.4480으로 형성하였고, 코아층은 두께 8 μm , 굴절률 1.4523으로 형성하여 굴절률차 0.3%의 슬랩도파로를 제작하였다. 그림 2는 본 실험에서 제작한 실리카 슬랩도파로의 제원이다. 실리카막의 두께와 굴절률은 자체 제작한 프리즘 커플러를 사용하여 측정하였다.

3.2. 측정장치 제작 및 손실측정

슬랩도파로를 도파하는 빛의 거리에 따른 감쇄를 측정하여 손실을 측정할 수 있는 굴절률 정합액 장치의 구조는 그림 3과 같다. 이 장치는 레이저 및 거울로 이루어진 광원부, 레이저를 슬랩에 결합시키는 프리즘 커플러, 정합액이 담긴 용기 및 정합액을 통해 나오는 광도 측정용 포토디텍터의 4부분으로 구성되어 있다. 프리즘 커플러는 회전스테이지 위에 프리즘과 슬랩도파로 시편을 장착할 수 있는 프리즘 홀더를 부착한 구조인데 회전축을 수평으로 세워서 슬랩 시편을 굴절률 정합액에 담그기 용이하게 하였다. 코아막의 굴절률이 1550 nm에서 1.4523이므로 본 실험에서는 1.487의 굴절률을 가진 CARGILLE 1160 굴절률 정합액을 사용하였다. 정합액 용기는 그림과 같이 V자형으로 제작하여 translation stage에 부착하여 도파로와 평행한 방향으로 이동할 수 있게 하였다. 이때 회전스테이지의 각도를 조절하여 슬랩에 도파모드를 여기한 다음 정합액 용기를 이동시켜 슬랩도파로 시편이 정합액에 담기도록 하였다. 정합액 용기가 부착되어 있는 translation stage는 linear actuator에 부착하여 PC로 구동하여 이동시켰다. linear actuator의 이동속도는 굴절률 정합액의 표면과 실리카도파로의 표면이 안정된 경계선을 유지할 수

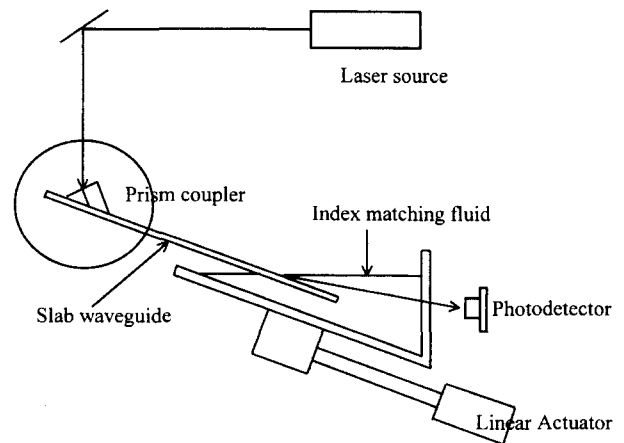


그림 3. 굴절률 정합액 장치의 구조.

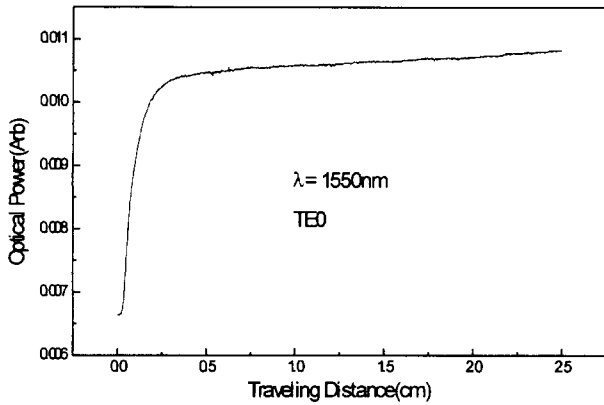


그림 4. 측정된 전형적인 슬랩도파로의 이동거리에 따른 광도 변화.

있도록 충분히 낮은 속도 (0.1 mm/sec)로 구동하였다. 슬랩도파로와 정합액의 경계선에서 빠져나온 빛은 정합액과 유리 용기를 통과하여 나오게 되는데 이때 빛이 나오는 유리 용기의 벽면에 지름 10 mm의 포토디텍터를 부착하여 슬랩도파로의 위치에 따른 광도를 PC로 기록하였다.

광원으로는 파장 632 nm의 He-Ne 레이저와 1300 nm 및 1550 nm의 반도체 레이저를 사용하였고 이들 세 광원은 Dichronic Mirror를 사용하여 하나의 광로로 유도하고 거울을 사용하여 레이저광을 수직으로 프리즘에 입사시켰다. 프리즘커플러의 회전스테이지의 회전각도를 조절하여 측정하고자 하는 모드를 선택한 후 슬랩도파로 시편의 끝부분을 굴절을 정합액에 담근 후 linear actuator를 구동하여 유리용기의 옆면으로 출사되는 광도를 PC로 기록하였다. 그림 4는 이렇게 얻어진 슬랩도파로의 거리에 따른 광도 변화를 보인 것이다. 이 그림에서 X축은 슬랩도파로가 이동한 거리이며 Y축은 그에 따른 출사광의 광도 변화를 기록한 것이다. 슬랩도파로가 굴절을 정합액속으로 이동하면 그만큼 프리즘커플러의 결합지점과 굴절을 정합액과 슬랩도파로의 경계에서 출사되는 지점과의 거리가 짧아지므로 그림과 같이 광도가 증가하게 된다. 측정 초기에 보이는 급격한 광도 증가는 linear actuator를 구동하기 전에 미리 시편 끝부분을 굴절을 정합액에 담가 놓았기 때문에 정합액이 도파로의 표면을 따라 올라감으로서 공기중으로 방사되던 빛이 본격적으로 슬랩도파로가 정합액속으로 진행하면서 정상적으로 측정되는 과정이다. 손실계수를 계산할 때는 초기의 광도가 급격히 변하는 부분은 삭제하고 계산하였다. Y축의 광도를 상용로그를 취한 후 선형회귀식을 사용하여 기울기를 구하면 그 값이 바로 원하는 손실계수가 된다.

손실 측정에 사용될 슬랩도파로 시편은 너비 10 mm의 장방향으로 절단하여 준비하였다. 길이는 제한이 없으나 본 측정 실험에서는 40 mm 내지 70 mm의 길이의 시편이 사용되었다. 그림 5는 632 nm 파장의 He-Ne레이저 광에 대한 TE₀ 및 TM₀ 기본모드의 손실 측정 결과이다. 직선의 기울기로부터 TE₀ 모드는 0.09 dB/cm, TM₀ 모드는 0.22 dB/cm의 손실을 각각 보여 주고 있다. TM 모드의 손실이 TE 모드 보다 큰 것은 TM 모드의 전기장이 도파로면에 수직이어서 하부 클래드 및

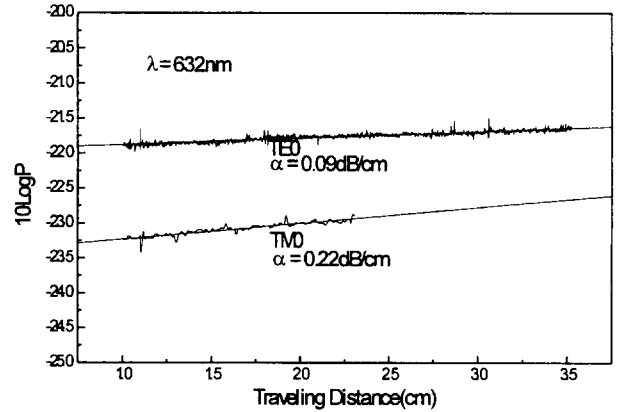


그림 5. 632 nm 파장에서 실리카 슬랩도파로의 전송손실 측정. TE₀에서 0.09 dB/cm, TM₀에서 0.22 dB/cm의 손실을 보인다.

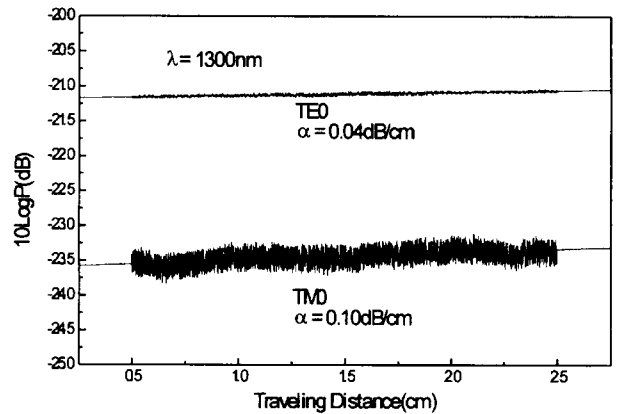


그림 6. 1300 nm 파장에서 실리카 슬랩도파로의 전송손실 측정. TE₀에서 0.04 dB/cm, TM₀에서 0.10 dB/cm의 손실을 보인다.

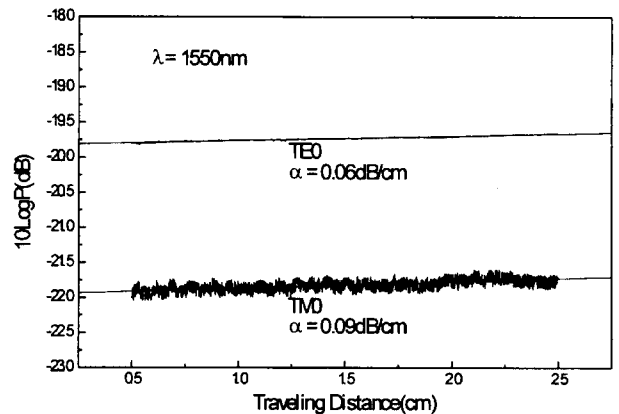


그림 7. 1550 nm 파장에서 실리카 슬랩도파로의 전송손실 측정. TE₀에서 0.06 dB/cm, TM₀에서 0.09 dB/cm의 손실을 보인다.

공기중으로 evanescent field가 많이 누출되기 때문으로 해석되며 클래드층과 코어층 사이의 계면과 코어층과 공기의 계면의 surface morphology 상태에 따라 더욱 큰 영향을 받을 것으로 생각되나 이에 대한 실험은 추후 진행할 예정이다. 그

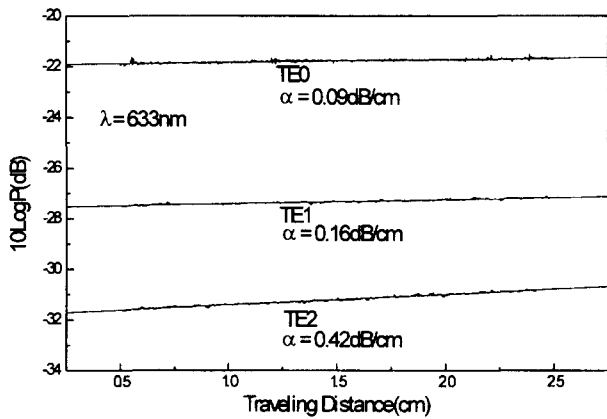


그림 8. 633 nm 파장에서 실리카 슬랩도파로의 모드별 전송 손실.

림 6 및 그림 7은 1300 nm 및 1550 nm 파장에서의 도파로 손실을 측정한 결과로서 TE₀ 모드의 손실이 각각 0.04 dB/cm 및 0.06 dB/cm 로 측정되었다. 프리즘 커플러는 모드 분리가 가능하므로 모드차수별 손실 특성도 측정할 수 있었다. 그림 8은 633 nm 파장의 기본모드, 1차 및 2차 모드의 손실을 측정한 결과이다. 차수가 높아지면서 급격한 손실의 증가를 보이고 있는데 이는 역시 상기 TE, TM 모드의 경우와 마찬가지로 고차 모드의 전기장이 저차 모드보다 코어 외부 즉, 클래드층 및 공기중으로 많이 누출되기 때문으로 생각된다.

IV. 결 론

FHD 공정으로 실리카 슬랩도파로를 제작하고 전송손실을 측정하였다. 슬랩도파로의 언더클래드, 코어막의 두께 및 굴절률차는 각각 25 μm, 8 μm 및 0.3%로 제작하였다. 전송손

실 측정에는 프리즘커플링으로 빛을 입사시키고 굴절률 정합액으로 광을 출사시키는 장치를 제작 사용하였다. 종래에는 도파로의 각 지점에서의 광도를 측정하기 위하여 광을 출력 시킴에 있어서 도파로를 절단하거나, 프리즘을 사용하는 관계로 출력 광도가 도파로 단면상태 또는 프리즘과 도파로의 결합률에 따라 변하고 측정 데이터의 숫자에도 제한이 있기 때문에 정밀한 측정에 문제가 많았다. 굴절률 정합액 장치는 도파로 각 지점에서의 빛을 출사시킴에 있어 굴절률 정합액을 사용하기 때문에 측정광도를 안정적이고 연속적이며 비파괴적으로 측정할 수 있어서 실리카와 같은 저손실 도파로 측정에 적합하다. 이 방법으로 측정된 실리카 슬랩도파로의 전송손실은 1300 nm 및 633 nm에서 각각 0.04 dB/cm 및 0.09 dB/cm의 값을 보였다.

참고문헌

- [1] Hunsperger, R. G., *Integrated Optics: Theory and Technology*, Springer-Verlag, 1982, 83-85.
- [2] 이형중, 임기진, 정창섭, 정환재, 김진승, *한국광학회지*, **3**, 258 (1992).
- [3] Okamura Y., Yoshinaka S., and Yamamoto S., *Appl. Opt.* **22**, 3892 (1983)
- [4] Himel M. D. and Gibson U. J., *Appl. Opt.* **25**, 4413 (1986).
- [5] Tien P. K., Ulrich R. and Martin R. J., *Appl. Phys. Lett.* **14**, 291 (1969).
- [6] Won, Y. H., P. C. Jausaud, and G.H. Chartier, *Appl. Phys. Lett.*, **37**(3), 755-757 (1980).
- [7] Teng, C. C., *Appl. Opt.*, **32**, 1051 (1993).
- [8] 심재기, 이윤학, 성희경, 최태구, FHD법에 의한 B₂O₃-P₂O₅-SiO₂실리카막의 효과적인 P₂O₅ 도핑; *한국요업학회지*, **35**, 364 (1998).

Propagation loss measurement of silica slab waveguide using index matching fluid

H. K. Sung, S. H. Park, J. U. Shin and J. K. Sim

Silica Optical Components Team,

Electronics and Telecommunications Research Institute, Taejeon 305-350, Korea

(Received October 19, 1998, Revised manuscript received March 5, 1999)

The propagation loss of silica slab waveguides were measured by immersing slab waveguides into a index matching liquid. Index matching liquid was used for out-coupling the light from arbitrary points of slab waveguide. The measured value of propagation loss are 0.04 dB/cm and 0.09 dB at 1300 nm and 633 nm respectively.