

실리콘 기판의 광집적회로를 위한 Pyrex 무응력 도파박막

문형명 · 정형곤 · 이웅태 · 김환수 · 전영윤* · 정석종 · 윤선현 · 이형중

전남대학교 물리학과, 정보통신연구관리단*

(1998년 2월 2일 받음, 1998년 5월 2일 수정본 받음)

에어로졸 화염증착법을 개발하고 이 방법을 써서 실리콘 기판 위에 Pyrex 무응력 도파박막을 제작하였다. 파이렉스 도파박막계의 굴절률을 조절하기 위하여 지르코늄을 첨가하였으며, 지르코늄 함량이 0 wt%부터 3 wt%까지 변하는 경우 굴절률이 1.460부터 1.475까지 변화하였다. 파이렉스 도파로의 평판도파로형 광증폭기에 응용 가능성을 보기 위하여 어븀을 첨가하여 보았으며 어븀 함량이 0 wt%부터 1 wt%까지 변하는 경우 박막의 굴절률이 1.460부터 1.465까지 변화함을 확인하였다. 프리즘 커플러를 써서 제작된 도파박막에 광을 여기시킨 결과 광집적회로에 응용이 가능한 수준의 투과성이 우수한 박막임을 확인하였다. 파이렉스 도파박막의 편광 변화에 따른 박막굴절률의 변화는 2×10^{-4} 이하로 측정되었다.

I. 서 론

광집적회로에는 유리, 폴리머, LiNbO_3 , InP 등의 다양한 재료가 사용된다. 이들 재료는 서로 그 기능 및 소자 제작방법에서 차이가 있으며, 이로 인하여 그 응용이나 단위 기능소자들의 집적형태가 각기 달라지게 된다. 최근 광통신 및 광신호처리용 광소자에 실리콘을 기판으로 한 실리카 평면광회로가 많이 연구되고 있다.^[1] 이는 실리카 재료가 다른 재료에 비하여 저손실이고 환경내구성이 크며 광섬유와 융착연결, 저가격 대량생산 등의 측면에서 많은 장점을 갖기 때문이다. 특히 평면광회로의 기판으로 실리콘을 사용할 경우 전자소자의 집적, 실리콘의 V-홈에 의한 광섬유 접속, 도파로 바닥층으로 실리콘 산화막의 이용, 실리콘의 우수한 열방출성을 이용한 반도체 레이저 패키징 등의 여러 측면에 장점이 있으며 따라서 최근 실리콘 기판에 AWG (Arrayed Waveguide Grating), 광분할기, 광송수신 모듈 등의 여러 단위소자들을 집적한 실리카 평판 광집적회로(Planar Lightwaveguide Circuits; PLCs)가 광통신에 응용을 목표로 연구가 되었다.^[2]

실리콘과 실리카는 열팽창률이 각각 $3.5 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ 및 $0.5 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ 로써 큰 차이가 있다. 실리콘 기판에 실리카 박막을 만들 때는 화염가수분해증착법 (FHD; Flame Hydrolysis deposition)^[3] 또는 화학기상증착법 (CVD; Chemical Vapor Deposition)^[4] 등의 방법을 써서 주로 고온에서 제작되며, Sol-Gel 용액의 스핀 코팅법^[5] 등의 방법에 의한 저온 제작의 경우에도 박막의 질을 좋게 하기 위하여 높은 온도로 열처리하는 것이 보통이다.^[6] 따라서 실리콘 기판에 실리카 박막을 제작할 경우 박막은 큰 응력을 받게 되며, 특히 열처리 과정 후에 기판이 뒤틀리는 등의 변형이 생기거나 변형까지는 가지 않더라도 유리박막의 전이온도(glass transition temperature; T_g)에 비례하는 인장력을 받아 복굴절이 유도되고 결국은 도파박막에

편광의존성을 남기게 된다. 복굴절이 유도된 박막 또는 이와 같은 박막으로 제작한 광회로는 광회로에 입사되는 광의 편광상태가 기판에 수직 또는 수평인가에 따라서 서로 다른 광경로차를 주게 된다. 따라서 광회로소자 특히 광회로간의 경로차를 이용하는 소자의 경우는 입사광의 편광상태에 따라 그 특성이 달라지며 편광제어를 하지 않는 보통의 광섬유를 써서 광회로에 입력광신호를 줄 경우 편광에 따라 신호전달이나 증폭이 달라져서 원래의 신호가 크게 왜곡되고 통신에 지장을 주게 된다.^[7]

이와같은 도파로의 편광의존성을 제거하기 위해 실리카 기판을 사용하거나^[8] 실리콘^[9] 또는 질화실리콘 박막에 의한 응력을 상쇄시키는 방법이 연구되었다.^[10] 그러나 실리카 기판은 가격이 비싸고 또한 박막의 열팽창률이 기판과 차이가 다소 큰 경우 쉽게 박막에 균열이 가는 등의 어려움이 있으며, 실리콘 또는 질화실리콘 박막에 의한 응력 상쇄법 역시 공정이 복잡하고 제어가 어려워 경제적 및 기술적 측면에서 좋은 해결책이 되지 못하고 있다. 또 다른 방법은 편광의존성이 기판과 도파박막의 열팽창계수 차이에 기인하므로 도파박막을 실리콘 기판과 거의 같은 열팽창 계수를 갖는 재료로 선택하는 것이다. 본 연구에서는 다성분계 유리중 파이렉스 유리계의 열팽창계수($33 \times 10^{-7} \text{K}^{-1}$)가 실리콘의 열팽창 계수와 유사함을 이용하여 이를 이용한 실리콘 기판상의 응력이 없는 도파박막의 제작을 시도하였다.^[11]

파이렉스는 나트륨이나 알루미늄의 금속산화물을 수% 포함하는 붕규산 유리계이다. 그러나 이와같은 금속을 포함하는 화합물들은 일반적으로 포화증기압이 매우 낮고 따라서 이같은 금속을 포함하는 박막 재료는 얻기가 매우 어렵다. 따라서 여기서는 이 같은 재료를 첨가하기 위하여 에어로졸 공정을^[12] 개발하였으며 이 방법을 이용하여 나트륨이나 알루미늄 화합물을 용액상으로 만들어 박막에 첨가하였다. 본 연구의 AFD (Aerosol Flame Deposition) 방법은 증착속도가 매우 커서 도파로형 후막을 제작하는데 효율적이라는 점에서 FHD와 같으나 증착용액의 조성과 같은 용액의 고유특성들이

*본 연구는 한국과학재단 핵심전문연구비(961-0206-028-1)지원으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

sol-gel 반응에 의해 미리 산화물 미립자가 되어서 화염증착과정에서도 보존되어 증착된다는 점에서는 FHD보다 공정상 중요한 장점을 갖는다.

이 연구에서는 파이렉스 도파박막계를 구성하기 위하여 파이렉스에 부가적 재료로 지르코늄 화합물의 용액을 첨가하여 박막 내의 굴절을 분포를 제어할 수 있도록 하였다. 또한 어븀과 같은 희토류 재료를 파이렉스 박막에 첨가하여 광증폭기용 도파파로써 응용가능성을 조사하였다. 특히 파이렉스 박막은 비방사천이를 일으키는 실리카 매트릭스내의 희토류 이온의 밀집을 방지하므로 광증폭기로 응용할 경우 단위길이당 이득효율이 좋고 4 dB/cm 이상의 높은 이득을 얻을 수 있다는 장점이 있다. 따라서 FTTH (Fiber to the Home) 광통신 응용에서 그 필요성이 부각되는 저가, 소형 및 집적가능한 형태의 평판형 도파증폭기 (EDPA; Er-Doped Planar Amplifier) 에 그 응용이 기대된다.

II. 실험 장치

2.1. 에어로졸 발생장치

에어로졸은 기체 내에 액체나 고체상의 작은 미립자들이 안개형태로 뿌려져있는 것을 일컬으며 AFD는 액체 에어로졸을 화염에 의하여 고체 에어로졸 방울로 만들어 기판에 산화물 미립자막을 입히고 다시 고온 열처리에 의하여 고밀화된 박막을 만드는 기술이다. 일반적으로 액체 에어로졸은 상변화를 거치며 핵화(nucleation)와 성장이 서로 경쟁적으로 일어나며 방울들이 커지거나 결정화된다. 그러나 액체상태의 에어로졸 방울들이 화염속을 통과하면 다른 방울들과의 만남 없이 바로 산화물 입자가 되기도 하는데 이 방법이 AFD 공정에 사용된다. 액체 에어로졸을 이용하면 기체 상태로 만들 수 없는 물질도 수송이 가능할 뿐 아니라 같은 조건에서 기체 상으로 만들 수 없는 여러 물질을 동시에 섞어서 수송시킬 수도 있다. 이러한 특성 때문에 다른 방법으로는 수송이 매우 어려운 Na, Ca 등을 포함하는 다성분계 유리입자를 증착할 수 있고 지르코늄이나 어븀과 같은 중금속 또는 희토류 원소까지 용이하게 첨가할 수 있다.

액체상태의 용액에서 작은 물방울로 분사되는 에어로졸을 만드는 방법은 베르누이 정리를 이용하여 기체가 좁은 관을 통과할 때 속도가 빨라지고 빨라진 속도에 의하여 압력이 낮아져 아래 부분에 있던 액체가 분무되어 나오는 방법과 빠른 기체를 흘러 난류를 발생시켜 이 난류에 의해 에어로졸을 발생시키는 방법 등이 있다.^[13] 그러나 이렇게 생성시킨 에어로졸 방울들은 속도가 빠를 뿐 아니라 속도를 임의로 조절할 수 없어 AFD 공법에는 적합하지 않다. 반면에 1927년 Wood와 Loomis에 의하여 발견된 초음파를 이용한 에어로졸 발생법은 만들어진 에어로졸의 속도와 크기를 임의로 조절할 수 있는 장점을 가지고 있다.^[14] 이 방법은 초음파가 액체를 통과하여 액체와 기체의 경계면에 도착하면 그 경계면에서 액체 방울이 생성되는 원리를 이용한 것으로써 가슴기를 만드는데 사용되는 방법이다. 이때 생기는 입자의 크기는 액체의 밀도(ρ_L)와 표면장력 (σ_L), 초음파의 각진동수(ω_0) 등

에 의하여

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

로 주어진다. 예로써 1.5 MHz의 초음파가 시료에 가해지면 대략 4 μm 크기의 방울이 생긴다.

에어로졸 발생장치의 맨 밑에 초음파를 발생시킬 수 있는 직경 1 cm의 PZT(1.5 MHz)를 장착했다. PZT에 의하여 발생된 초음파는 시료용액에 바로 가해지는 것이 아니며 물과 얇은 랩을 통과하여 시료용액에 가해지게 된다. 즉 PZT는 물과 접촉하고 물과 시료용액의 경계는 얇은 랩을 사용하여 분리되게 하였다. 여기서 물은 PZT에서 발생된 열을 냉각하고, 용액과 공기의 계면에서 비선형 음향효과에 의하여 발생된 열을 흡수하는 역할을 하며 소형모터펌프에 의하여 물통과의 사이에서 순환된다. 이와 같은 물에 의한 냉각과정이 없을 경우에는 용액의 온도가 상승하여 용액의 점도를 변화시켜 에어로졸 발생에 영향을 미치고 용액에서 일어나는 sol-gel 반응에 영향을 주게 된다. 또한 이같은 구조는 시료용액과 PZT의 직접 접촉을 방지하여 PZT에 의한 용액의 오염이나 용액에 의한 PZT의 부식을 방지한다.

2.2. 토치 및 웨이퍼 홀더

에어로졸은 수송기체(carrier gas)에 의하여 테프론 관을 따라서 토치까지 수송된다. 에어로졸 방울이 토치 화염을 통과할 때 에어로졸의 유기적 조성과 용매 및 물은 모두 증발하고 산화반응이 진행되어 산화물 미립자가 되며 이 미립자는 기체의 대류와 열분포 구배에 의한 힘을 받아 토치 상부에 위치한 웨이퍼에 증착된다. 토치는 직경이 각각 다른 네 개의 석영관을 중심으로 수직하게 세워 위로 향하는 방향으로 사용하였고 연소기체와 에어로졸이 토치의 석영관 하부로부터 공급된다. 중앙에 있는 관으로는 에어로졸이 수송기체인 질소와 함께 흘러나오고 그 다음 관으로 수소가 흐르고 그 다음 관은 산소가 흐른다. 최외각에는 실내기체의 대류 등에 의한 화염의 흔들림을 없애기 위해 토치의 석영관보다 더 길게 토치와 중심으로 석영관을 설치하였다. 토치의 수직 위 부분에 웨이퍼 홀더를 설치하였다. 웨이퍼 홀더는 진공을 뽑아 실리콘 웨이퍼를

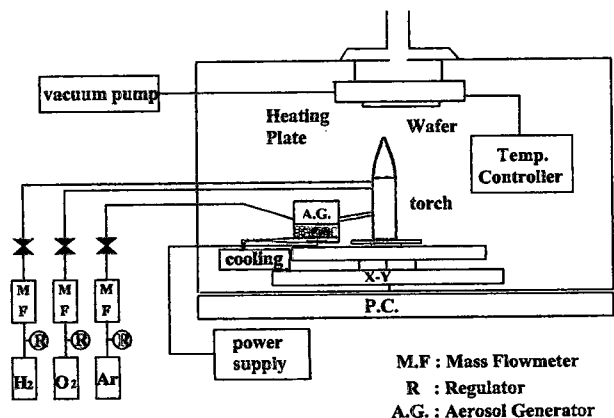


Fig. 1. Schematic diagram of aerosol flame deposition apparatus.

고정시키고 온도를 일정하게 유지시키는 작용을 한다.

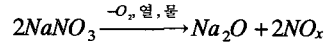
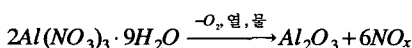
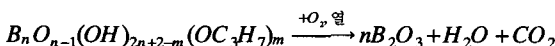
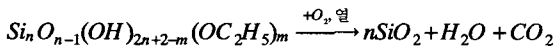
홀더는 온도조절기를 사용하여 웨이퍼의 온도를 300°C로 유지하였다. 박막을 증착하는 동안 웨이퍼의 온도는 토치 화염의 영향으로 약간의 변화는 있으나 히터로 예열하였을 경우 온도에 큰 변화는 없었으며 증착 공정중에 균일한 온도 분포를 이루었다. 웨이퍼 홀더는 상단에 고정되어있고 토치는 X, Y 방향으로 스테핑모터를 사용하여 움직이도록 설계되었다. 움직임은 초당 약 1-5 cm 속도로 움직이며 박막 전체의 균일한 증착을 위해 PC로 속도 및 방향을 조절하였다.

III. 실험 및 결과

3.1. 박막 제작

3성분 Na₂O-B₂O₃-SiO₂ 유리중 파이렉스계 유리는 그 조성이 붕소 이상 현상을 나타내는 불혼화 영역에 있으며 따라서 열팽창 계수가 낮고 미세한 상분리가 일어나게 됨이 알려져 있다. 이와같은 상분리를 억제하기 위하여 보통 Al₂O₃를 첨가한다.^[15] 본 연구에서는 질량비가 SiO₂ 81%, B₂O₃ 13%, Na₂O 4%, Al₂O₃ 2%가 되는 조성으로 파이렉스 박막을 제작하였다. 이 조성에 따른 파이렉스 유리는 열팽창계수가 3.3×10⁻⁶K⁻¹이고 연화점 820°C, 밀도 2.23 g/cm³임이 알려져 있다.^[16]

AFD 방법을 사용하여 이러한 조성비를 갖는 파이렉스 박막을 만들기 위해서는 먼저 액체 상태의 용액을 만들어야한다. 실리콘과 붕소재료는 7.47 g의 Tetraethyl orthosilicate (TEOS)와 1.8 g의 Triisopropyl Borate B[(CH₃)₂CHO]₃를 사용하였다. 나트륨과 알루미늄재료는 0.27 g의 NaNO₃와 0.38 g의 Al(NO₃)₃·9H₂O (Aluminum nitrate nanohydrate)를 사용하였으며 여기에 6 g의 메탄올, 30 g의 물과 0.33 g의 HNO₃를 혼합하였다. 이같은 비례는 혼합용액이 화학적으로 잘 섞이고 적절한 속도로 가수분해가 일어나도록 선택되었다. 약품을 혼합하는 순서도 재료가 잘 섞이게 하기 위해서 먼저 TEOS를 메탄올에 희석시키고 물에 고체상체인 metal nitrate를 녹여서 2시간 동안 혼합시킨다. 여기에 borate를 첨가하고 자석교반기를 사용하여 3시간 동안 혼합한 후에 사용하였다. 이때 TEOS는 용액 내에서 수소이온농도에 의하여 반응속도가 조절되면서 nSi(OC₂H₅)₄+2nH₂O 상태에서 Si_nO_{n-1}(OH)_{2n+2-m}(OC₂H₅)_m+(4n-m) C₂H₅OH+H₂O 상태로 반응이 진행된다. 또 TEOS와는 반응속도가 다르기는 하나 Triisopropyl borate 역시 용액 내에서 수소이온농도에 의해 반응속도가 조절되면서 nB(OC₃H₇)₃+2nH₂O 상태에서 B_nO_{n-1}(OH)_{2n+2-m}(OC₃H₇)_m+(4n-m) CH₃OH+H₂O 상태로 반응이 일어난다. 반응이 충분히 진행된 후에 에어졸 발생기에 용액을 넣고 에어로졸을 만들어 토치까지 수송시킨 후에 화염속에서 반응을 일으키면 다음과 같은 화학식을 거쳐 고체화된 유리 알갱이를 얻을 수 있게된다.



토치에서 위와 같은 반응이 일어나는 동안 화염의 온도가 너무 높으면 에어로졸 입자들은 그 물리적 및 화학적 성질이 변하여 다음의 녹임 공정에서 열처리를 하여도 투명한 박막이 잘 되지 않는다. 반대로 불꽃의 온도가 너무 낮은 경우에는 적절한 정도의 산화과정을 진행시킬수 없으므로 역시 깨끗한 박막을 얻을 수 없다. 따라서 적절한 불꽃의 온도 및 화염과 웨이퍼간의 거리를 유지하여야 한다. 본 실험에서는 수소 유량이 400 sccm이고 수소와 산소의 유량 비를 1:3으로 하고 질소는 수소와 거의 같은 유량을 흘려주었다. 이때 박막의 증착률은 0.5 μm/min이다.

3.2. 박막의 열처리

기판에 증착된 입자 박막을 투명한 유리 박막으로 만들기 위해서는 높은 온도의 녹임 과정을 거쳐야 하며 녹임 공정은 석영관과 SiC 발열체로 제작된 열처리용 전기로에서 하였다. 열처리는 박막에 쌓여진 유기물이나 수산기 등을 제거하는 건조 열처리와 고밀화시키기 위한 녹임 열처리로 이루어진다.

건조 열처리에서는 산화물 미립자가 쌓여있는 웨이퍼를 1차 열처리 온도 T₁까지 온도 증가율 R₁으로 승온시켜 일정시간 D₁동안 유지시킨다. 다음으로 2차 열처리 온도 T₂까지 온도 증가율 R₂로 온도를 승온시켜 일정시간 D₂동안 유지시킨 후 온도변화율 R₃로 상온까지 식한다. 먼저 R₁의 경우는 보통 5초 동안에 상온에서 600도까지 변화시켰으며, 이보다 더 천천히 온도를 변화시켜도 건조과정에 미치는 영향은 크게 달라지지 않았다. 양질의 박막을 얻기 위해서 1차 열처리 온도를 300도에서 800도까지 변화시켜 보았으며 soot의 색깔이 변하지 않는 가장 높은 온도인 약 500도 근처가 최적 온도였다. 건조시간 D₁은 충분히 유기물과 수산기를 제거하기 위해 1시간 이상 건조하였다.

녹임 열처리의 최적조건을 구하기 위하여 온도를 600도에서 1200도까지 승온시간은 5초부터 8시간까지 변화시켜 보았다. 그 결과 천천히 온도를 증가시킬수록 결정화가 심하게 진행되었으며 수초동안에 온도를 급상승시킨 경우에 양질의 박막이 얻어졌다. 이같은 빠른 온도변화는 2개의 온도대역을 갖는 머플전기로에 약 1.5 m 정도 되는 석영관을 장착하고 웨이퍼 위치를 석영관 내의 두 온도대역간에 이동시킴으로써 가능하였다. 녹임 열처리 온도 T₂를 900도에서 1300도까지 변화시킨 결과 1200도에서 가장 깨끗한 박막을 얻을 수 있었다. 열처리 시간 D₂는 1분에서 8시간 정도까지 변화시켜 보았으며 그 결과 2시간 이상의 경우에 박막의 상태가 가장 양호했고 시간 증가에 따라서는 큰 변화가 없었다. 끝으로 녹임 열처리 후 상온까지 온도를 내리는 방법은 먼저 전기로의 전원을 끈 상태로 약 12시간 동안에 1200도에서 상온까지 내려보았다. 그 결과 녹임 열처리 과정에서 천천히 승온시킬때와 비슷하게 수 mm 간격으로 균대균대 1 mm 정도 직경을 가진 결합부위가 박막 위에 생겼으며 이와 반대로 수초 내에 상온으로 냉각시킬 경우 맑은 박막을 얻을 수 있었다. 일반적으로 유리제작에서 상분리를 최소화하기 위하여 급냉 방법을 주로

사용된다. 따라서 더욱 빠른 시간 내에 웨이퍼의 온도를 낮추기 위하여 미리 준비한 냉각된 동판에 웨이퍼를 접촉시켜 급냉시켜보았으며 이 경우 열접촉없이 대기 중에 냉각할 때와 큰 차이는 없었다.

결과적으로 웨이퍼 홀더에서 탈착된 웨이퍼는 수초 내에 상온에서 500도 정도의 온도로 올려 2시간 건조시킨 후 다시 수초 내에 500도에서 1200도까지 온도를 변화시켜 녹임 열처리를 하였으며, 약 2시간 후 웨이퍼를 바로 꺼내서 동판에 접촉시켜 온도를 급작스럽게 낮추어 투명한 박막을 얻을 수 있었다.

IV. 박막의 특성평가

4.1. 성분 분석

에어로졸 화염증착법에 의한 박막의 제작은 에어로졸 발생기의 액체용액으로부터, 액체방울로서 수송과정, 그리고 화염을 통과하여 고체 알갱이로 증착 및 열처리후 최종적인 박막에 이르기까지 여러 과정을 거친다. 따라서 최종적인 박막의 조성이 원래 액체용액의 조성과 다소 다를 수도 있으므로 이와 같은 점을 확인하기 위하여 액체용액과 박막의 성분을 각각 측정하여 비교해 보았다. 용액조성은 전자저울을 이용한 시료정량으로 그리고 박막은 ESCA를 이용한 조성분석으로 측정하였으며 서로 비교한 결과 그 성분비가 10% 내의 실험적 상대오차 내에서 잘 일치하였다. 또한 시료에 들어가는 성분을 조절해가며 본 연구의 시료 제작조건으로 만들어진 박막의 변화를 관찰한 결과 본 실험에서 의도한 조성비 근처 즉 질량비가 SiO₂ 81%, B₂O₃ 13%, Na₂O 4%, Al₂O₃ 2%일 때에 가장 투명한 박막을 얻을 수 있었다.

4.2. 지르코늄과 어븀 첨가

다성분계 유리의 장점은 지르코늄과 같은 금속이나 어븀 등의 희토류 금속을 비교적 높은 농도로 상분리가 없이 쉽게 첨가할 수 있다는 것이다. 물론 본 연구에서는 액체 용액에 지르코늄 및 희토류 금속 화합물을 각각 녹인후 에어로졸 형태로 수송하여 증착하는 AFD 방법의 장점을 이용하였다. 파이렉스 유리에 지르코늄을 첨가하면 굴절률은 농도에 비례하여 커지며 따라서 지르코늄의 함량 조정으로 도파로의 바닥 및 덮개층과 코어층을 만들 수 있다. 지르코늄 재료는 지르코늄옥시아세테이트(ZrO(CH₃COOH)₂) 형태를 사용하였고 기존의 파이렉스 유리를 만드는 용액에 첨가하였다. 지르코늄의 첨가량을 3.0 wt% 까지 증가시키며 굴절률 변화를 측정하였다. Fig. 2에 나타난 것과 같이 굴절률이 1.460에서 1.475까지 변화하였으며 지르코늄 농도와 상관없이 상분리가 없는 투명한 박막을 얻을 수 있었다.

그리고 파이렉스 박막에 어븀을 첨가하여 도파로 코어층을 만들고 굴절률을 측정하였다. 어븀은 파이렉스 유리를 만들기 위한 시료용액에 어븀아세테이트하이드레이트 ([CH₃CO₂]₂Er · H₂O) 형태로 1.0 wt%까지 첨가하였다. 이에 따라서 굴절률은 Fig. 2에 나타난 것과 같이 1.460에서 1.465 까지 변화하였다. 어븀의 양이 많아지면 시료용액의 점도가 커져 에어로

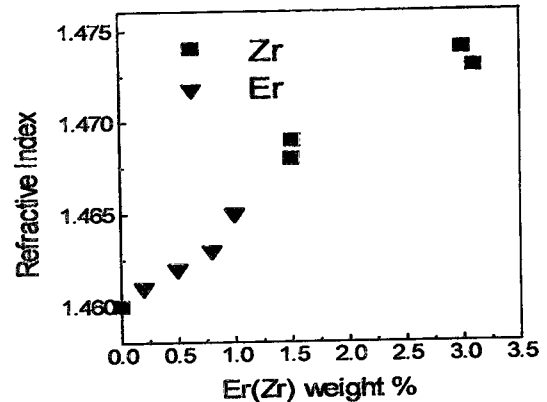


Fig. 2. Refractive index of Pyrex glass film doped with Er or Zr.

졸이 잘 발생되지 않는 경향이 있으나 이는 물과 알코올의 양을 늘려 희석시켜 사용하면 가능하다.

4.3. 프리즘 커플러에 의한 굴절률 측정

제작된 박막의 두께 및 굴절률을 프리즘 커플러를 사용하여 측정하였다. 프리즘을 통해 입사된 광은 프리즘과 박막의 계면에서 대부분 반사된다. 그러나 프리즘에 입사하는 빛의 각도를 바꾸어주면 특정한 각에서 빛의 반사율은 최저가 된다. 이는 프리즘과 박막 사이의 더 낮은 굴절률층(흔히 공기막)에서 입사광의 감쇄파(evanescent field)가 생기고 이 감쇄파에 의하여 도파박막계의 도파층으로 에너지를 투과시켜 도파박막계의 공진조건 즉 도파모우드의 형성조건을 만족하는 특정한 각에서 감쇄파에 의해 도파 박막계에 침투한 빛이 박막을 통해 전파되어 빠져나가기 때문이다. 이때 반사된 빛의 세기를 측정하면 도파박막의 특성 즉 굴절률이나 두께를 알 수 있다. 이와 같은 측정법은 집적광학 박막의 모우드 유효굴절률 측정에 사용되는 중요한 측정방법 중의 하나로서 그 정밀도는 1×10^{-4} 정도로 고정밀도 측정이 가능하며, 집적 광학의 태동과 더불어 연구된 측정 기법이다.^[17]

프리즘 커플러에 입사되는 빛의 편광을 90도 회전시키면 도파박막계의 TM 모우드와 TE 모우드에 의한 박막의 굴절률 및 두께를 측정할 수 있다. Fig. 3에는 실리콘 기판위에 제작된 파이렉스 박막의 프리즘 입사각 변화에 따른 반사율의 감소치가 모우드굴절률의 (프리즘 입사각으로 환산됨) 함수로 나타나있다.^[17] 가는 실선은 TM 모우드 입사광에 의한 박막의 모우드 공진 스펙트럼이고 굵은 실선은 TE 모우드 입사광에 의한 박막의 모우드 공진 스펙트럼이다. TE 모우드와 TM모우드 간에 공진 커플링의 상대적 세기 차이는 TE와 TM 입사광의 세기에 기인한 것이고 두께나 굴절률 등의 박막특성은 피크의 위치에 의해서만 결정되므로 Fig. 3으로부터 제작된 박막은 두 편광상태에 대하여 거의 동일한 굴절률을($\Delta n < 2 \times 10^{-4}$) 가지고 있다 할 수 있다. 이는 제작된 박막의 복굴절 효과가 매우 작음을 의미하며 복굴절을 유도시키는 실리콘 기판과 파이렉스 박막 간의 응력이 작고 따라서 두 재질간에 열팽창 계수의 차이가 거의 없음을 의미한다.

Fig. 4는 실리콘 기판 위에 파이렉스 바닥층을 쌓고 다시 그

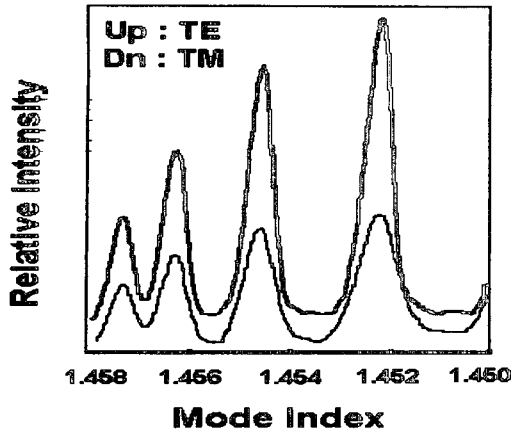


Fig. 3. Prism-coupling spectrum of TE and TM mode of Pyrex-glass single film on silicon substrate. (Upper line is TM mode and lower line TE mode.)

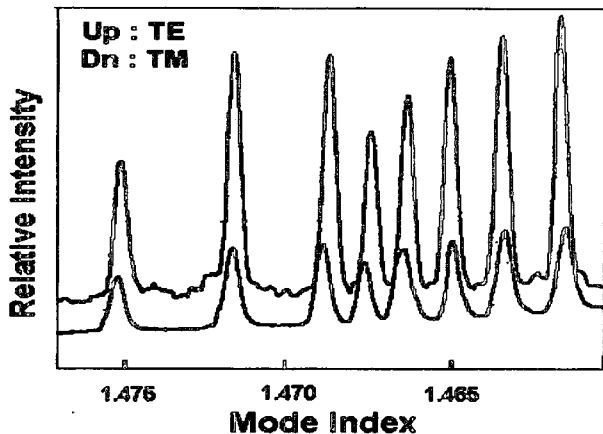


Fig. 4. Prism-coupling spectrum of TE and TM mode of Pyrex-glass waveguide layer on silicon substrate. (Waveguide layer consists of lower cladding and upper core layer. Upper line is TM mode and lower line TE mode.)

위에 굴절률이 더 높은 지르코늄을 첨가한 파이렉스 도파층을 쌓은 박막계에 대한 TE와 TM의 모우드 공진 스펙트럼이다. 이러한 박막계는 도파광이 실리콘 기판과 접촉하지 않고 전파 되도록 하여 실리콘 기판으로 빠져나가는 광손실을 제거한 것이다. 바닥층과 도파로 코어층 모두 실리콘 기판에 대하여 응력이 없는 층으로서 TM 모우드와 TE 모우드의 굴절을 차가 매우 적고 따라서 거의 편광에 무관한 도파박막임을 알 수 있다. 실리카 도파로의 경우 응력에 의한 도파로의 복굴절은 보통 6×10^{-4} 정도로서 본 연구에서는 이와같은 복굴절 효과를 1/3 이하로 줄였으며 그 이하로 줄이는 것도 박막의 조성이나 열처리 등의 최적화에 의하여 가능할 것으로 기대된다.

V. 결 론

가까운 미래에 사용될 유용한 광통신용 소자로서 크게 기대되고 있는 FHD나 CVD방법으로 만드는 실리콘 기판의 실리카 광회로는 여러 가지 장점에도 불구하고 편광의존도가

크다는 단점으로 인하여 실용상의 여러 가지 문제가 야기되어 왔다. 이러한 편광 의존성은 실리콘 기판과 도파박막과의 열팽창 계수차에 의한 응력 때문에 야기되며 그 결과 박막에는 복굴절이 생기게 되고 따라서 동 박막으로 만드는 광회로 소자들은 입사광의 편광상태에 따라서 그 특성이 변하게 된다. 따라서 본 연구에서는 AFD방법을 새로이 개발하고 이를 이용하여 실리콘 기판과 열팽창 계수가 거의 같은 파이렉스 유리 박막을 도파로로 개발하였다. 또 증착된 AFD박막의 건조와 고밀화를 위하여 열처리방법이 연구되었다. 웨이퍼홀더에서 전기로로 옮겨진 박막은 수 초 이내에 500도 근처로 가열되어 2시간 정도 건조된 후 수 초 이내에 다시 1200도로 가열되었다. 2시간 정도 고밀화를 거친 후 다시 수 초 이내에 상온으로 냉각시키는 방법에 의하여 맑고 투명한 파이렉스 유리 박막을 제조하였다. 제작된 박막의 굴절률과 박막의 두께, 편광의존성 등을 프리즘커플러를 사용하여 측정하였으며 제작된 박막이 편광 의존성이 없다는 것을 프리즘 커플러를 사용하여 확인하였다. ($\Delta n < 2 \times 10^{-4}$)

또한 도파층 형성을 위한 굴절을 변화를 주기 위하여 지르코늄을 첨가하여 보았다. 그 결과 복굴절이 매우 작고 굴절률이 1.460-1.475 범위에서 변화하는 광도파 특성이 좋은 Zr-Pyrex계 도파박막계를 만들 수 있었다. 그리고 희토류 금속인 어븀을 첨가하여 평판형 증폭 도파로 제작의 가능성을 연구하였다. 그 결과 어븀 1% 범위 안에서 상분리가 없고 복굴절이 매우 작으며 굴절률이 1.460-1.475로 변화하는 양질의 도파로를 제작할 수 있었다.

참고문헌

- [1] M. Kawachi, *Optical and Quantum Electronics* **22**, 391(1990).
- [2] Shimizu N., *Electronics and Communications in Japan* **67-C(9)**, 115(1984).
- [3] 전영운 외, *한국광학회지* **5(4)**, 499(1994).
- [4] 이형중 외, *한국광학회지* **3(4)**, 258(1992); 정환재 외, *한국광학회지* **4(3)**, 266(1993); 정환재 외, *한국광학회지* **6(3)**, 233(1995).
- [5] R. R. A. Syms, *J. of Non-Crystalline Solids* **167**, 16(1994); R. R. A. Syms et. al., *J. of Non-Crystalline Solids* **170**, 223(1994).
- [6] C. H. Henry et. al., *Appl. Opt.* **26(13)**, 2621(1987).
- [7] N. Takato et. al., *J. of Lightwave Tech.* **6**, 1003(1988).
- [8] S. Suzuki et. al., *Electronics Lett.* **30(8)**, 642(1994).
- [9] M. Okuno et. al., *J. Lightwave Technol.* **12(4)**, 625(1994).
- [10] H. Yaffe et. al., *J. Lightwave Technol.* **12(1)**, 64(1994).
- [11] 문형명 외, *Photonics Conference (강릉대학교, 1996. 11.)*; S. H. Youn et. al., *Technical Digest of 2nd Optoelectronics and Communications Conf. (Seoul, July 1997)* pp.502-503.
- [12] T. F. Morse, A. Kilian and L. Reingart, *J. Non-Cryst. Solids* **129**, 93(1991).
- [13] A. H. Lefebvre, *Atomisation and Sprays* (Hemisphere Publishing Company, 1989).
- [14] D. D. Lobdell, *J. Acoust. Soc. Am.* **43**, 229(1967).

- [15] Milos B. Volf, *Chemical Approach to Glass* (Elsevier, New York, 1984).
[16] N. P. Bansal and R. H. Doremus, *Handbook of Glass Properties* (Harcourt Brace Javanovich Publisher, New York, 1986).
[17] H. J. Lee, C. H. Henry, K. J. Orlovsky, R. F. Kazarinov, and T. Y. Kometani, *Appl. Opt.* 27(19), 4104(1988).

Stress-Free Pyrex-Based Optical Waveguide for Planar Lightwave Circuits on Silicon Substrate

Hyung Myung Moon, Hyung Gon Ceong, Yong Tae Lee, Han Soo Kim, Young Yun Chun*,

Suck Jong Chung, Sun Hyun Yun and Hyung Jong Lee

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

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

(Received February 2, 1998, Revised manuscript received May 2, 1998)

We developed aerosol flame deposition method and made stress-free Pyrex-based optical waveguide on silicon substrate using this method. Zr is doped to control the refractive index of Pyrex waveguide layers. The refractive index of the film changes from 1.460 to 1.475 as the content of Zr changes from 0 to 3 wt%. Er is doped to see the possibility of applying this Pyrex waveguide as PLC-type (Planar Lightwave Circuit) optical amplifier. The refractive index of the film changes from 1.460 to 1.465 as the content of Zr changes from 0 to 1 wt%. Light launching using a prism coupler to the fabricated waveguide showed good quality for application to PLC. The polarization dependence of refractive-index of the Pyrex film is measured to be less than 2×10^{-4} .