

Si 기판  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$  rib형 광도파로의 매립형  
 Bragg 반사 광회로 제작과 유효굴절률의 계산  
 Fabrication of buried  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$  rib waveguide Bragg reflectors  
 on Si and calculation of effective reflective indices

이 형 종\*, 이 용 탁\*\*, 강 민 호\*\*, 이 상 수\*\*\*

\* : 전남대학교 물리학과

\*\* : 전자통신연구소

\*\*\* : 한국과학기술원 물리학과

ABSTRACT

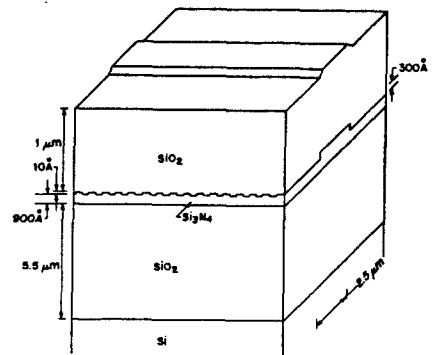
Buried Bragg reflectors which are immune to the contamination of the surface of an optical waveguide chip are fabricated on  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$  rib optical waveguides on Si. The effective refractive indices and the bandwidths of the fabricated buried Bragg reflector waveguides are determined by transmission measurement. We show that the measured values of the effective refractive indices are consistent with the calculated values as the width of the waveguide rib varies. Propagation losses of the guided modes due to the leakage into the Si substrate are also calculated.

도파로의 취급시에 격자 표면의 오염에 매우 취약하다. 또한 이 방법은 제작된 회로를 접촉재 등을 사용하여 광섬유와 결합시킬 때 격자를 오염시킬 가능성이 높다. 본 연구에서는  $\text{Si}_3\text{N}_4$  광도파중에 직접 격자를 제작하는 기법을 연구하여 광회로의 특성이 기판 표면의 오염에 무관한 매립형 브래그 반사 광회로를 제작하는 방법을 개발하였다. 매립형 브래그 반사 광회로는 표피층에 격자를 제작하지 않으므로, 온도에 대한 굴절률의 변화가 큰 Si-rubber 등을 표피층으로 사용하여 가변파장 브래그 광반사기를 제작하는 데에도 이용할 수 있는 장점이 있다.

2. 매립형 브래그 반사 광회로의 제작 및 특성 측정

1. 서론

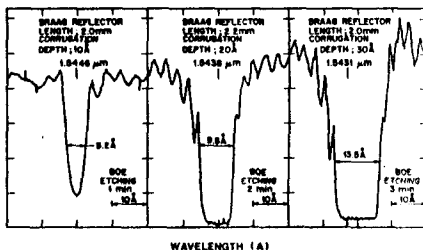
브래그(Bragg) 반사 광도파로는 브래그 반사 광도파로의 반사 격자가 갖는 고분해 특성때문에 광필터<sup>(1)</sup>, 광공진기<sup>(2)</sup>, DFB LD(distributed feedback laser diode) 또는 브래그 반사 광도파로 레이저 다이오드<sup>(3)</sup> 등의 많은 광통신 및 광 신호처리의 응용에 있어서 매우 중요한 소자이다. 현재까지 Si 기판의  $\text{Si}_3\text{N}_4$  광도파로 기술에서 브래그 반사기의 제작은  $\text{SiO}_2$  표피층에 반사 격자를 제작하는 방법이<sup>(4)</sup> 주로 사용되어 왔으나 이 방법은 격자가 도파로의 표면에 노출이 되어 광



(그림 1)  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$  매립형 브래그 반사 광도파로의 구조

매립형 브래그 반사기의 구조는 그림 1과 같다. Si 위의 SiO<sub>2</sub>층과 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>층은 LPCVD(low pressure chemical vapor deposition) 방법으로 제작하며<sup>(5)</sup>, 이때 SiO<sub>2</sub>층의 증착시, SiO<sub>2</sub>층의 균열(cracking)을 방지하기 위하여 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>를 SiO<sub>2</sub> 내에 2%(wt.)가 되도록 SiO<sub>2</sub>와 동시에 증착한다. 제작된 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 층 위에 photolithography 방법으로 rib형의 광도파로를 식각하고, 다시 500Å의 Cr을 증착시켜 photolithography 방법에 의해 홀로그래픽 회절격자를<sup>(4)</sup> Cr층에 제작한다. Cr층에 제작된 격자를 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>의 식각 마스크(mask)로 이용되며, BOE(buffered oxide etchant; 9NH<sub>4</sub>F:1HF)로서 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>를 10-30 Å 정도 식각하여, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 격자층을 제작한다. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>의 식각으로는 보통 H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>(80°C)를 사용하나<sup>(5)</sup> 그 식각 속도가 크고 식각 깊이를 조절하기가 힘들다. 그러나 BOE는 그 식각정도가 10Å/min 정도로서 매우 작고 그 조절이 용이할 뿐만 아니라 비교적 균일한 식각을 할 수 있다는 장점이 있다. 제작된 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 격자 위의 Cr은 CAN(ceric ammonium nitrate 18%, acetic acid 5% 수용액)으로 제거하고 다시 1H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:1H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>(80°C)에 15분간 처리한다. 그 위에 SiO<sub>2</sub>포피층을 증착하여 매립형 브래그 반사 광회로를 완성한다.

매립형 브래그 반사광회로의 투과 스펙트럼은 그림 2와 같다. 측정장원은 1.5μm 부반사증착 LD를 사용하고, 투과 스펙트럼은 현미경 대물렌즈 40X로 입력 및 출력의 광도파로 단면에 초점을 맞추어 분광기와 Ge



(그림 2) Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-SiO<sub>2</sub> 매립형 브래그 반사 광도파로의 반사 격자 깊이에 대한 투과 스펙트럼의 변화

광검출기를 사용하여 측정하였다.

길이 L, 도파손실 α 인 브래그반사 광도파로의 장(field) 반사율은<sup>(6)</sup>

$$r = ik / [\mu \coth(\mu L) - (i\Delta\omega/v_g - \alpha/2)] \quad (1)$$

로 주어지며,  $\kappa = 1/L_B$  는 결합(coupling)상수,  $v_g$  는 군속도,  $\Delta\omega$  는 공진 반사폭의 중심에서부터 주파수이며,  $\mu^2 = \kappa^2 + [i\Delta\omega/v_g - \alpha/2]^2$  이다.  $L = 2L_B$  일때 투과 스펙트럼의 반치폭은<sup>(1)</sup>

$$\Delta\lambda = 7.1/L_B \quad (\Delta\lambda: \text{Å}, L_B: \text{mm}) \quad (2)$$

로 주어지며,  $L = 2L_B$  일때 반사율  $R(=r^2)$ 은 93%이다.

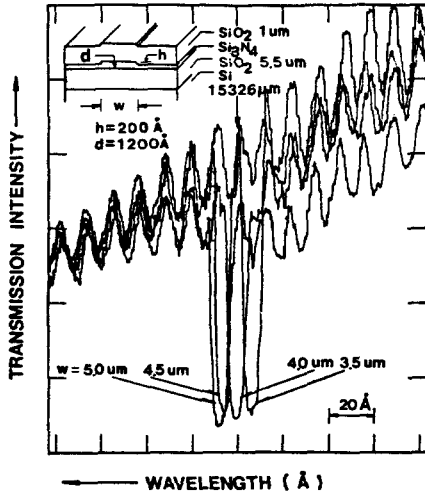
모드 커플이론(coupled mode theory)을<sup>(7)</sup> 이용하여 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 격자의 길이로부터 브래그 반사폭 Δλ를 구하면 그림1과 같은 도파로의 경우 격자길이 10Å당 브래그 반사폭 5Å이 계산되었다. 이 계산 결과는 그림2와 잘 일치한다. 또한 그림2에서 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>의 식각 시간에따라 선형적으로 투과 선폭이 변하고 있으며 이는 BOE에 의한 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>의 식각이 수십 Å 정도의 미세한 식각의 경우에도 시간에대해 선형적임을 나타낸다.

### 3. Rib형 광도파로의 이론계산 및 유효굴절률 측정

광도파로의 제작시 광도파로의 유효굴절률과 광손실률은 그 도파로의 도파특성을 결정하는 중요한 요소들이다. 매립형 브래그 반사 광회로의 경우 광도파로의 유효굴절률을 브래그반사를 이용하여 측정하였으며, 도파로의 폭에따른 유효굴절률의 변화를 조사하였다. 또한 rib형 광도파로의 이론으로부터 도파로의 유효굴절률과 Si기판에의한 광손실률을 계산하였다. 그림3은 rib의 높이 h가 200 Å 이고, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>층의 두께 d가 1200 Å 일때 rib의 폭 3.5-5 μm에대한 투과스펙트럼을 측정한 것이다. 유효굴절률  $n_{eff}$ 는

$$n_{eff} = \lambda_B / 2\Lambda \quad (3)$$

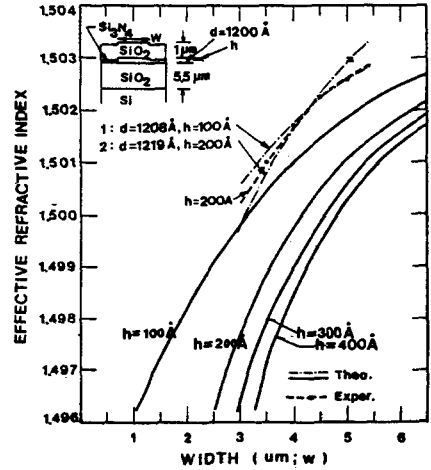
로 주어지며, 여기서  $\lambda_B$ 는 브래그 반사의 중심파장이다.



(그림 3) Rib폭의 변화에 대한 rib형  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$  브리 그 반사 광도파로의 투과 스펙트럼 변화

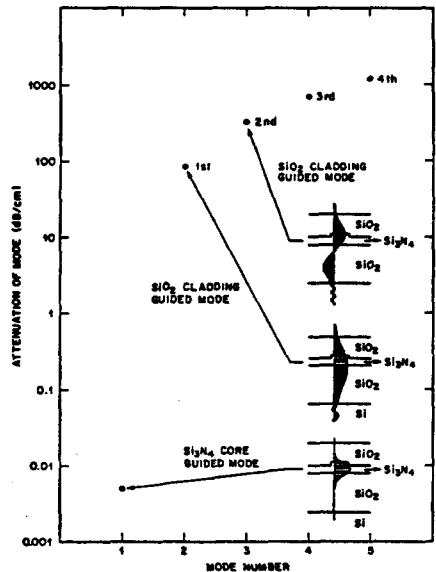
$\Lambda$ 는 격자주기이며 He-Ne 레이저를 이용하여 격자의 회절각을 측정하여 구할 수 있다. 측정된  $\Lambda$ 는 5103Å 이고 그림3의  $\lambda_0$ 와 (3)식으로부터  $n_{\text{eff}}$ 를 구한다. 그림 4에는  $\lambda_0$ 의 측정에 의한  $n_{\text{eff}}$ 값과 d와 h의 변화에 대한 이론계산치  $n_{\text{eff}}$ 를 나타내었다. rib형 2차원 광도파로의 계산에는 유효굴절률방법(effective index method)을 사용하였다.<sup>(6)</sup> 계산에 의하면 h가 일정할때 d의 변화에 대한  $n_{\text{eff}}$ -w곡선은 일정한값 만큼 상하로 이동된다. 측정치와의 비교를 위해 d를 변화시켜 측정치에 근사하게 일치하는 h가 100 Å 과 200 Å 인 광도파로의 유효 굴절률을 계산하여 측정치와 함께 곡선으로 나타내었다. 그림4에서 측정치 곡선의 기울기에 의하면 rib의 높이 h는 200 Å 이 아니고 150 Å 정도임을 알 수 있다. 여기서  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 의 두께 d를 변화시킨 것은  $\text{Si}_3\text{N}_4$  박막의 제작시 d에 대한 정밀도의 한계가 수십 Å 임을 고려한 것이다.

도파 광모드들의 손실률, 즉 Si 기반( $n=3.48$ )으로 빠져나가는 광의 손실률은 그림5에 나타내었다.  $\text{Si}_3\text{N}_4$  층을 도파층으로하는 광모드는 그 손실률을 무시할 수 있을정도의 작은 값을 나타내고 있으며,  $\text{SiO}_2\text{-Si}_3$



(그림 4) Rib형  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$  광도파로의 유효굴절률 계산 결과

$\text{N}_4\text{-SiO}_2$ 의 3층을 도파층으로하는 광모드의 손실률은 약 100dB/cm 이상의 큰 손실률을 나타내고 있다. 따라서 Si와  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 층을 격리해주는  $\text{SiO}_2$ 층의 두께가 5.5 μm 이상이면 Si 기반에 의한  $\text{Si}_3\text{N}_4$  도파광모드손실의 효과는 무시할 수 있음을 알 수 있다.



(그림 5) Si 기반의  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$  광도파로의 Si 기반에 의한 도파 손실을 계산 결과

## 4. 결론

광회로 기관의 오염에 무관한 매립형 브래그반사 광도파로를 rib형  $\text{SiO}_2$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$  광도파로상에 제작하고, 투과 스펙트럼을 측정하여 브래그반사 대역폭과 브래그 반사 격자깊이와의 관계를 조사하였다. BOE에 의한  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 의 식각법이 수십 A 길이의 미세한 식각에 사용될 수 있음을 보였고, 이때 시간에대해 식각 깊이가 거의 선형적임을 보였다. 또한 rib형 광도파로의 경우 rib의 폭과 높이 따른 유효굴절률과 Si 기관에 의한 도파장의 손실률을 계산했으며, 투과 스펙트럼에 의해 측정된 유효굴절률은 rib의 폭이 변함에 따라서 이론 계산치와 잘 일치함을 보였고, Si 기관에 의한  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 에 도파되는 광의 손실률은 기저  $\text{SiO}_2$ 층의 두께가  $5\mu\text{m}$ 보다 크면 무시할 수 있을 정도임을 보였다.

## 참고문헌

1. H. J. Lee, N. A. Olsson, C. H. Henry, et.al., Appl. Opt. 27, 211(1988)
2. C. H. Henry, R. F. Kazarinov, H. J. Lee, et.al., IEEE J. Quan. Elect. QE-23, 1426(1987)
3. N. A. Olsson, C. H. Henry, R. F. Kazarinov, et.al., Appl. Phys. Lett. 51, 92(1988); Appl. Phys. Lett. 51, 1141(1987)
4. H. J. Lee, Appl. Opt. 27, 1199(1988)
5. John L. Vossen and Werner Kern, "Thin Film Processes", Academic Press New York, 1978
6. S. L. McCall and P. M. Platzman, IEEE J. Quan. Elect. QE-21, 1899(1985)
7. Lynn D. Hutcheson, "Integrated Optical Circuits and Components", Marcel Dekker Inc. New York, 1987
8. M. J. Adams, "An Introduction to Optical Waveguides", John Wiley New York, 1981