

열광학 효과를 이용한 $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$ 도파로 가변 브래그필터*

이 형 중

전남대학교 자연과학대학 물리학과

정 환 재

전남대학교 사범대학 물리교육과

(1992년 10월 12일 받음)

SiO_2 를 덮개층으로 하는 Si_3N_4 rib 도파로의 $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$ 계면에 브래그격자를 제작하여 매립된 형태의 단일모우드 브래그필터 도파로를 설계하고 제작하였다. HF 완충용액을 사용하여 Si_3N_4 코어층에 브래그격자를 식각하였으며, 1 nm까지 식각깊이를 제어하며 균일하게 식각할 수 있었다. 이러한 매립된 형태의 브래그필터는 그 특성이 소자표면의 오염에 영향을 받지 않는다. 브래그필터의 파장스펙트럼 측정에서 도파로의 모우드굴절률과 반사대역폭을 결정하고 이를 계산과 비교하여 논의하였다. 브래그필터의 도파코어층에 미세히터와 silicone rubber의 덮개층을 올려 필터파장을 가변할 수 있는 도파로 가변 필터소자를 제작하였다. 그 결과 브래그파장은 전류의 제곱에 비례하여 단파장 쪽으로 이동하였으며, 이동량은 10 mA의 전류에 대해 0.41 nm이다.

I. 서 론

브래그격자(Bragg grating) 도파로는 도파광의 진행방향으로 굴절률이 주기적으로 변하게 함으로서 브래그파장에서 도파광 진행의 반대방향 도파모우드로 모우드전이 일어나게 하는 도파로 광소자이다. 이 광소자는 다중격자로 이루어져 있으며, 그 구조상 다중격자가 갖는 고분해 필터특성 및 공진특성 때문에 DFB(distributed feedback) 레이저 등의 고속 변조특성을 갖는 광통신용 반도체레이저 및 고밀도 채널 WDM(wavelength division multiplexing)용 광집적회로에의^[1] 응용이 연구되어 왔다.

브래그격자 도파로에서 브래그파장은 $\lambda_B = 2\Lambda n_{mode}$ 로서 모우드굴절률과 격자주기에 의해 정해지며, 격자 도파로를 쓰는 광소자의 특성파장을 결정한다. 따라서 λ_B 를 외부신호에 의하여 가변시킬 수 있다면 이러한 광소자의 파장특성을 가변 및 제어할 수 있게 된다. 브래그파장을 가변하려면 모우드굴절률이나 격자주기를 변화시켜야 한다. 그러나 보통 브래그격자는 그 주기가 도파로 위에 공간적으로 고정되어 이를 변화시키기 어려우며, 따라서

도파로의 재질특성에 따라서 전류, 전기장 또는 열 등에 의해 모우드굴절률 n_{mode} 를 변화시키면 브래그파장의 연속적인 가변이 가능하다. 예를 들면 DFB 레이저나 브래그공진기 반도체레이저의^[2] 경우 전류주입에 의해 공진기의 유효길이나 격자도파로의 모우드굴절률을 변화시켜 발진파장의 연속적인 가변이 가능하도록 할 수 있으며, 또한 WDM용 도파로 브래그필터 소자의 경우 브래그파장을 전기장, 또는 열에 의해 변화시킴으로서 WDM 채널파장의 연속적인 튜닝 또는 파장채널 간의 스위칭 등이 가능하게 할 수 있다. 그러나 전기장 또는 열광학적 방법에 의한 도파로의 브래그파장의 가변 또는 스위칭은 아직 보고된 바가 없다. 그러므로 여기서는 열광학 효과를 이용한 가변 브래그필터의 설계 및 제작에 관하여 논의하고자 한다.

$\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$ 도파로는^[3] 도파로의 코어(core)와 클래드(clad)간의 큰 굴절률 차로 인해 도파모우드의 구속이 크고, 따라서 반도체레이저와 모우드결합의 효율이 높아 반도체레이저의 외부도파로 소자로서 연구되어 왔다. 지금까지 이 도파로에서 브래그격자는 도파로의 클래드층 표면에 제작하는 것이 보통이었다. 그 이유는 표면

* 본 연구는 한국과학재단(903-0204-005-2)의 연구비 지원을 받아 이루어 졌음.

층에 격자를 만들면 격자의 결합상수가 작아져서 식각을 수십 내지 수백 nm 정도로 깊게해도 되며, 따라서 식각깊이의 제어가 쉽기 때문이다.^[4] 그러나 이 방법은 격자가 도파로의 표면에 노출되어 오염에 취약하므로 제작된 도파로에 수지 등을 사용하여 광섬유와 접합시 킬때 격자를 오염시킬 가능성이 높고, 또한 필터파장을 가변하기 위한 박막히터를 깊은 요철의 격자면에 제작하기 어려우므로 히터와 격자를 도파로 표면에 같이 제작하기 곤란한 단점이 있었다. 따라서 여기서는 도파로의 코어층에 직접 격자를 제작하는 방법을 써서 소자특성이 소자표면의 오염에 영향을 받지 않고 히터와 격자를 동일층에 같이 제작할 수 있는 매립형 브래그반사도파로를 도파모우드 분석과 격자 결합상수의 계산을 통하여 이를 설계하고 제작하였다. 그리고 코어층 위에 미세 히터를 제작하고, 도파로의 덮개층에 굴절률의 온도변화가 큰 silicone rubber를 사용하여, 브래그파장을 진류에 의해 가변시킬 수 있는 도파로 브래그필터를 제작하였다.^[5,6]

II. 이 론

1. 도파모우드의 계산

모우드굴절률과 광손실률은 도파로의 설계에 중요한 특성들로서 여기서는 이들을 계산하기 위해 유효굴절률법을 사용하였다. 이 방법은 여기서 제작할 그림 1의 도파로와 같이 도파층의 두께가 도파로의 폭에 비하여 매우 작은 경우에 잘 맞는 방법이다. 유효굴절률법은 도파로를 rib과 그 양측의 3 구간으로 나누고 각 구간의 박막계를 평판(slab)도파로로 가정하여 모우드굴절률을 구한 다음 rib과 그 양측 횡방향으로의 도파를 이들 모우드굴절률을 굴절률로하여 구성되는 새로운 평판도파로로 가정하여 rib 도파로의 모우드굴절률을 구하는 방법이다.^[7] 여기서 구한 모우드굴절률은 도파로 브래그필터의 설계 및 특성해석에 매우 중요하며 정밀한 계산이 요구된다. Si₃N₄ 도파로는 코어와 클래드간 굴절률차가 크므로 TE와 TM모우드의 모우드굴절률 및 도파함수가 크게 다르다. 그러나 이같은 차이로 인해 파장영역에서 두 모우드간의 간섭이 작으므로 여기서는 TE모우드만 논하기로 한다.

평판도파로의 모우드굴절률을 구하는 데는 K.H. Schlereth의 방법을 썼다.^[8] 박막에 수직인 방향을 x축, 평판방향을 y축, 도파광의 진행방향을 z축이라 하고, i번째 매질에서 빛의 전파상수는 k_i 그리고 k_i의 박막에 수직인 성분을 q_i라고 하자. 도파박막계의 각 층에서는 전진 및

후진파 (A_ie^{iq_iz} 및 B_ie^{-iq_iz}) 또는 감쇄 및 증가파의 (A_ie^{α_iz} 및 B_ie^{-α_iz}) 두 성분이 동시에 있다. 이 두 표현을 A_ie^{iq_iz}와 B_ie^{-iq_iz}의 (c; 복소수) 단일표현으로 나타낼 수 있고, 이를 행렬로 나타내면 $\begin{pmatrix} A_i \\ B_i \end{pmatrix}$ 와 같다. 그러나 박막계의 최상층과 최하층에서는 상기의 두 성분중 박막계로부터 멀어지는 진행파 또는 박막계로부터 감소해가는 감쇄파 중의 한가지만 있다. $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ 혹은 $\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ 따라서 최하층 또는 기관에서의 진폭은 각 박막계면의 경계조건으로 결정되는 2×2 행렬 M과 최상층에서의 진폭 $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ 의 곱으로 나타낼 수 있다. 도파모우드의 전파상수 β와 q_i와의 관계식 β=√k_i²-q_i²를 이용하면 최하층의 진폭은 β의 함수로 표시되며, 이 진폭이 $\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ 이 되는 β가 박막계의 최상층 및 최하층에서의 경계조건을 모두 만족하는 도파모우드의 전파상수이다. 여기서 도파모우드의 전파상수는 β=n_{mode}k₀로 정의된다.

이 방법은 박막층의 갯수나 모우드종류 등에 상관없이 폭 넓게 이용될 수 있는 방법으로서 방사모우드(radiation mode) 즉 기관의 굴절률이 모우드굴절률보다 큰 경우의 도파모우드에도 적용할 수 있으며, 이때 계산된 모우드굴절률의 허수부로부터 방사손실률 (radiation loss; 기관으로 새어나가는 광손실) 등을 계산할 수 있다. 위의 방법으로 그림 1의 도파로에 대해 모우드별 방사손실과 모우드굴절률을 계산하였으며 그 결과는 그림 2와 같다.

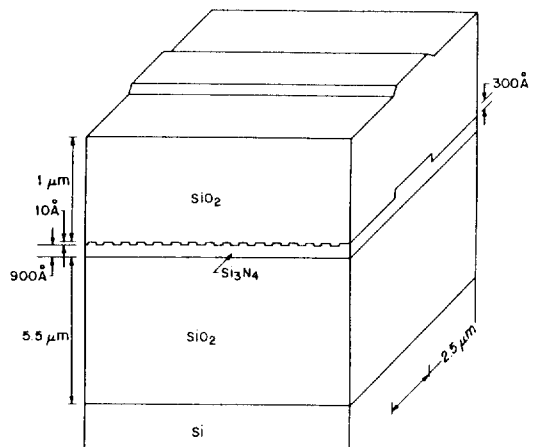


그림 1. Structure of Si₃N₄-SiO₂ rib waveguide Bragg reflector with buried corrugation.

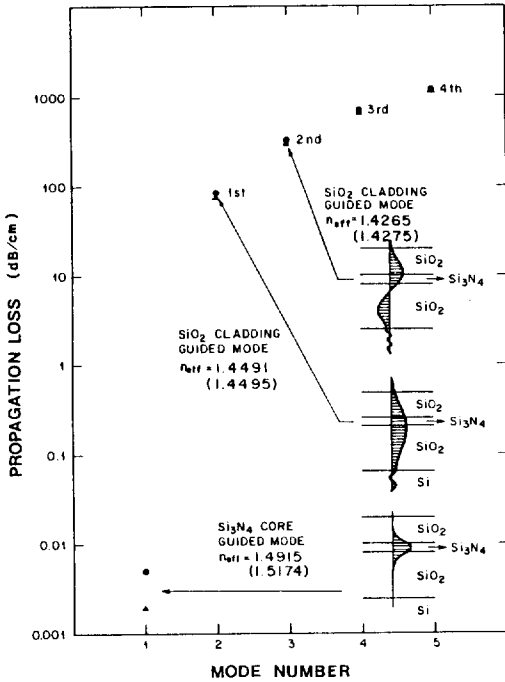


그림 2. Propagation loss and mode indice of the Si_3N_4 - SiO_2 slab waveguide: ● and n_{mode} for the core thickness of $0.09 \mu\text{m}$; ▲ and (n_{mode}) for the core thickness of $0.12 \mu\text{m}$; the thickness of cover, core and base layers are $1.0 \mu\text{m}$, $0.09 \mu\text{m}$ and $5.5 \mu\text{m}$; the refractive indices of Si_3N_4 , SiO_2 and Si are 2.0, 1.457 and 3.48; calculations are for the wavelength of $1.54 \mu\text{m}$.

그림 2에서 보면 기저층의 두께가 $5.5 \mu\text{m}$ 이상일 경우 Si_3N_4 층에 도파되는 모우드는 Si 기판으로의 방사손실률이 0.01 dB/cm 이하로서 매우 작은 반면에 SiO_2 - Si_3N_4 - SiO_2 의 3층에 도파되는 모우드는 약 100 dB/cm 이상으로 큰 방사손실률을 가짐을 알 수 있다.

위의 방법에 의하여 구한 평판도파로의 모우드굴절률로부터 유효굴절률법에 의하여^[7] Si_3N_4 rib에 의해 도파되는 모우드의 모우드굴절률을 계산할 수 있다. 이 계산은 3층 평판도파로의 문제로서 그 해가 잘 알려져 있으므로 논의를 생략한다. Rib 도파로의 모우드 $E(x,y)$ 는 유효굴절률법에 의해 x 방향과 y 방향의 함수 곱으로 쓸 수 있다.

$$E(x,y) = E_x(x)E_y(y) \quad (i=1; |x| \leq \frac{w}{2}, i=2; |x| \geq \frac{w}{2}) \quad (1)$$

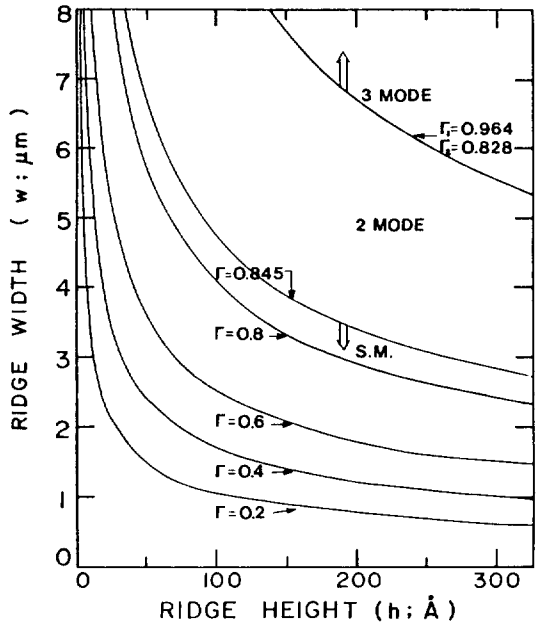


그림 3. Lateral confinement of the Si_3N_4 rib waveguide mode; the thickness of waveguide core is $0.12 \mu\text{m}$; calculations are for the wavelength of $1.54 \mu\text{m}$; Γ is the confinement factor of a single mode guide. Γ_1 and Γ_2 are the confinement factors of a two mode guide.

여기서 w 는 rib의 폭이고, $E_{x1}(x)$ 은 도파로의 rib 부분 평판도파로의 도파모우드이고 $E_{x2}(x)$ 는 rib 양측 평판도파로의 도파모우드이다. 함수 $E_{x1}(x)$, $E_{x2}(x)$ 및 $E_y(y)$ 는 앞에서 계산된 평판도파로의 모우드굴절률을 이용하면 구할 수 있다. 횡방향 모우드구속치 Γ 는 $E_y(y)$ 로 계산할 수 있으며 그 결과를 그림 3에 나타내었다. 계산에 사용된 도파로는 rib의 두께가 $0.12 \mu\text{m}$ 인 경우로서 그림 1과 2에 준하였다.

2. 브래그격자 도파로

격자모양이 구형(square shape)인 브래그격자 도파로의 결합상수(coupling constant)는 다음과 같이 쓸 수 있다.^[9]

$$\kappa = \frac{\sin(\pi f)}{n_{mode l}} \iint_{-\infty}^{\infty} E(x,y)^* \Delta n^2(x,y) E(x,y) dx dy \quad (2)$$

$$\iint_{-\infty}^{\infty} E(x,y)^* E(x,y) dx dy = 1 \quad (3)$$

f 는 격자의 모양인자(aspect ratio of grating)로서 격자의 선폭과 격자주기의 비율이며, $\Delta n^2(x,y)$ 는 격자에 의해

생기는 굴절률제곱의 섭동(perturbation)분포함수이고, 1은 구형격자를 푸리에급수로 전개할때의 첫수이다. 식(1)을 써서 Rib 도파로에 대한 κ 를 다시 쓰면 다음과 같으며 이 식의 Γ 는 그림 3의 모우드구속치 Γ 와 같다.

$$\kappa = \Gamma \kappa_1 + (1 - \Gamma) \kappa_2 \quad (4)$$

$$\kappa_i = 2 \frac{\sin(\pi f)}{n_{mode} l} \int_{d-d_g}^d E_{xi}(x) (n_c^2 - n_g^2) E_{xi}(x) dx \quad (i=1,2) \quad (5)$$

여기서 d 는 도파코어층의 두께, d_g 는 도파코어층에 식각된 격자의 깊이이고, n_c 및 n_g 는 클래드 및 코어층의 굴절률이다.

격자깊이가 2 nm인 평판 브래그격자 도파로에 대하여 도파층의 두께와 격자의 f 치에 따른 결합상수 κ 를 계산하여 그림 4에 나타냈다. 그림 4의 점선은 클래드의 굴절률이 1.457인 경우(실리카)이고 실선은 클래드의 굴절률이 1.397인 경우(silicone rubber)이다. 격자깊이 d_g 가 작을 경우 $E(x)$ 는 d_g 내에서 일정하다고 근사할 수 있으며, 이 경우 κ_i 는 d_g 에 비례한다.

길이 L , 도파손실 α 인 브래그반사 도파로의 파장특성은 모우드결합이론(coupled mode theory)^[10]에 의하여

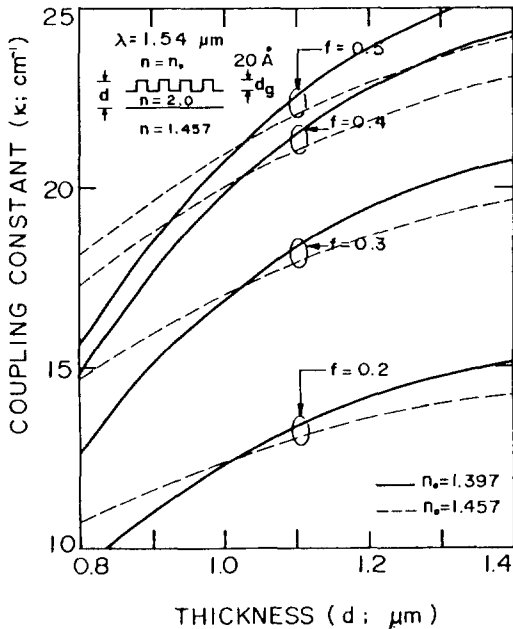


그림 4. Coupling constants of Bragg reflectors; SiO₂ ($n=1.457$) or silicone rubber ($n=1.397$) as a cover layer; f is an aspect ratio of grating.

다음과 같이 주어지는 도파모우드의 반사계수로부터 알 수 있다.

$$r = \frac{i\kappa \sinh(\mu L)}{\mu \cosh(\mu L) - (i\Delta\omega/v_g - \alpha/2) \sinh(\mu L)} \quad (6)$$

여기서 κ 는 결합(coupling)상수이고, v_g 는 군속도, $\Delta\omega$ 는 브래그 주파수로부터 주파수 변화이고, $\mu^2 = \kappa^2 + [i\Delta\omega/v_g - \alpha/2]^2$ 이다. 식 (6)으로 최대반사율 $|r|^2$ 과 반사대역의 반치폭(FWHM) $\Delta\lambda$ 를 구해보면^[11] 도파로의 길이 L 이 $2L_B$ 일때 최대반사율은 93%가 되며 $\Delta\lambda$ 는 다음과 같다. 여기서 브래그길이(Bragg length) L_B 는 $1/\kappa$ 이다.

$$\Delta\lambda = \frac{0.714}{L_B} \left(\frac{\lambda}{1.55} \right)^2 \quad (\Delta\lambda, \lambda, L_B; \mu\text{m}) \quad (7)$$

III. 제작 및 특성측정

1. Si₃N₄-SiO₂ 도파로 가변 브래그필터의 제작

본 연구에서 제작할 가변 브래그필터 도파로의 구조는 그림 5와 같다. 소자제작을 위한 기본 박막계는 Si을 기판으로하여 SiO₂ 박막과 Si₃N₄ 박막으로 되어있으며 LPCVD(low pressure chemical vapor deposition) 방법으로 만들었다. 도파로의 rib 패턴은 Si₃N₄ 박막에 50 nm 두께의 Cr 박막을 증착하고 포토레지스트를 도포하여 여기에 rib 패턴을 노광 및 현상한 다음에 CAN(ceric ammonium nitrate 18%, acetic acid 5% 수용액)으로 Cr층을 그 다음에 BOE(buffered oxide etchant; 9NH₄F : 1HF)로 Si₃N₄ 층을 식각(etching)하여 제작하였다. 여기서 Cr층은 Si₃N₄의 식각 마스크(mask)로 사용되며, rib 패턴의 노광시 Si 기판의 반사에 의한 광의 간섭을 없애주는 역할도 한다. Rib 패턴의 제작이 끝난 웨이퍼는 포토레지스트 및 Cr 마스크 층을 제거하고 증류수로 세척한다.

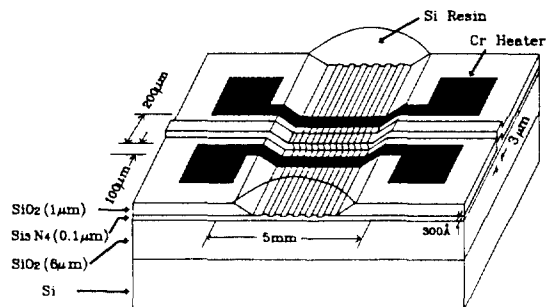


그림 5. Structure of tunable waveguide Bragg filter.

Si₃N₄층에 직접 격자를 제작하려면 Si₃N₄의 모우드구 속이 크므로 적당한 커플링 크기를 얻기 위하여서는 수 nm 정도의 매우 얇은 깊이의 격자를 제작해야 하며, 여기에 따르는 식각액의 선정, 식각의 균일성 및 재현성 등의 문제가 생기게 된다. Si₃N₄의 식각으로는 주로 H₃PO₄(180°C)를 사용하나 식각속도의 제어가 어렵다. 본 실험에서는 BOE에 의한 식각을 시도하였으며 식각속도가 1 nm/min 정도로서 식각정도의 조절이 용이하고 1 nm 정도까지 식각깊이를 제어하며 균일하게 식각할 수 있었다.

브래그격자는 위의 rib 패턴 제작과정과 같은 방법으로 웨이퍼 위에 Cr 층과 포토레지스트 층을 만들고 He-Cd 레이저를 써서 격자홀로그램을 노광 및 현상한 다음에 이를 CAN과 BOE로 식각하여 만들었다. 다음에 포토레지스트와 Cr 층을 제거하고 그 위에 1 μm의 SiO₂ 표피층을 LPCVD 방법으로 증착하여 매립된 형태의 브래그도파로를 완성한다. 그림 6은 Cr의 격자패턴이 있는 rib 도파로의 사진이다.

Silicone rubber의 굴절률은^[6] 광파장이 각각 1.3 μm 및 1.54 μm 일때 1.3996 및 1.3970이고 n_d=1.4095 (n_d: refractive index at Na lamp D line 589.2 nm)이며 그 분산특성은 실리카와 유사하다. Silicone rubber의 굴절률 온도계수는 dn_d/dT = -5.4 × 10⁻⁴/°C 로서 실리카의 온도계수 -1.28 × 10⁻⁵/°C 에 비해 매우 크며 도파로의 클래딩으로 사용하면 브래그필터의 파장 가변범위를 크게 할 수 있다. 브래그격자 도파로의 클래딩층의 일부를 HF로 제거하고 그림 5와 같이 Cr 박막히터를 제작한 다음 silicone rubber를 도포하여 가변 브래그필터를 만들었다. 사용된 silicone rubber는 Sylgard 184 silicone

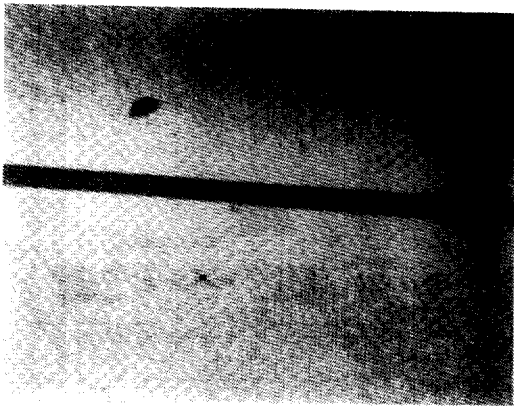


그림 6. Grating pattern of Cr on Si₃N₄-SiO₂ rib waveguide.

elastomer(Dow Corning Corporation)이다. 제작된 히터는 저항이 170~180 Ω인 두께 50 nm, 길이 5 mm, 폭 100 μm의 Cr 박막으로서 그림 5와 같이 도파로의 양측에 200 μm의 거리를 두고 두개를 만들어 도파로와 평행하게 배열해 서로 직렬로 연결하여 사용하였다.

2. 도파로 브래그필터의 특성측정

도파로 브래그필터의 모우드굴절률, 브래그파장 및 필터대역폭을 측정하기 위하여 도파로를 통과한 광의 파장스펙트럼을 조사하였다. 파장스펙트럼 측정에는 1.54 μm 반도체레이저 광을 (발진개시 임계전류 이하로 레이저를 동작시킴) 배율 40의 현미경렌즈로 집속하여 도파로 한쪽 단면에 조사시켜(end-fire coupling) 도파로에 입사시키고 분광기와 액체질소로 냉각된 Ge 광검출기를 사용하여 파장에 따른 투과광의 상대적 세기를 기록하는 방법을 사용하였다. 시료의 투과도가 1일 경우 투과량은 렌즈 입출력 커플링에 의하여 정해진다. 따라서 그 크기는 의미가 없으며 파장축에 대한 상대적 크기를 비교하였다. 여기서 투과도 0은 측정된 그림의 밑변이다.

그림 7은 도파로의 코어두께 d가 120 nm이고 rib의 높이 h가 10 nm일때 폭이 다른 여러 브래그필터 도파로에 대하여 파장스펙트럼을 측정한 것이다. Rib의 폭이 커질수록 브래그파장이 장파장 쪽으로 옮겨감을 알 수 있다. 그림 7에서 장파장쪽의 투과도가 낮은 이유는 광

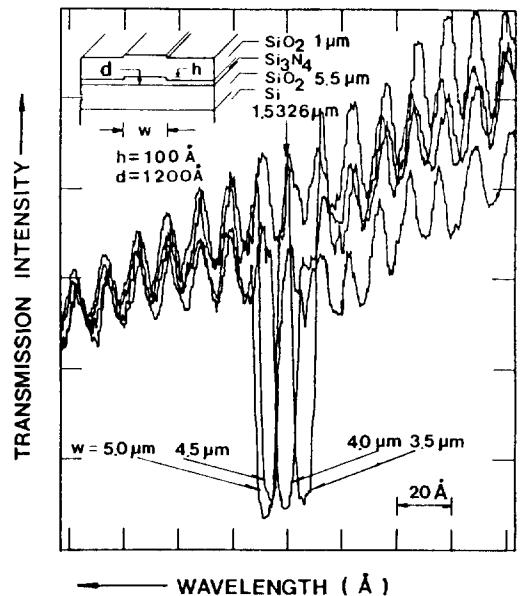


그림 7. Transmission spectrum of Si₃N₄-SiO₂ Bragg filter for variation of the rib width of waveguide.

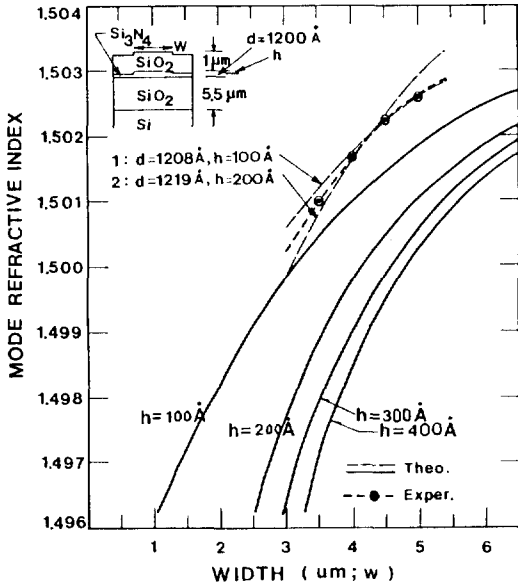


그림 8. Comparison of calculated and measured mode refractive index for Si₃N₄-SiO₂ waveguide Bragg filter.

원의 중심파장이 단파장쪽에 있기 때문이며 파장에 대한 투과도 크기의 요동은 반도체레이저의 패브리-피로 모우드에 의한 것이다. 도파로의 n_{mode} 는 코어의 두께에 따라서 민감하게 변하므로(그림 8 참조) 각각의 도파로에 대해 코어의 두께를 동일하게 하기 위하여 도파로 1개의 시료에 rib의 폭이 다른 여러개의 도파로를 200 μm 의 거리를 두고 배열하여 한꺼번에 제작하였다.

브래그반사 도파로의 모우드굴절률 n_{mode} 는 다음과 같다.

$$n_{mode} = \lambda_B / 2\Lambda \quad (8)$$

여기서 λ_B 는 브래그파장으로서 파장스펙트럼 측정에서 그리고 Λ 는 격자주기로서 He-Ne 레이저를 사용한 브래그격자의 회절각 측정에서 각각 0.1 nm 이내의 정밀도로 측정할 수 있다. 따라서 식 (8)에 의해 모우드굴절률을 ± 0.0002 이내의 정밀도로 구할 수 있다.

그림 8에 그림 7의 측정에서 구한 모우드굴절률과 유효굴절률법에 의해 계산한 모우드굴절률을 나타내었다. 그림 8의 굵은 실선은 도파코어의 두께가 120 nm일 때 rib의 폭 변화에 대한 모우드굴절률의 계산곡선이다. 코어두께 d가 달라짐에 따라서 이 곡선은 상하로 이동되며, rib의 높이가 클수록 그 기울기도 크다. 실제의 도파코어 두께 d는 120 nm로부터 실제치와 약간의 차이가 있으므로 모우드굴절률의 측정치와 계산치를 비교하기 위하여 굵은 실선으로 표시된 모우드굴절률 곡선의 d 값을

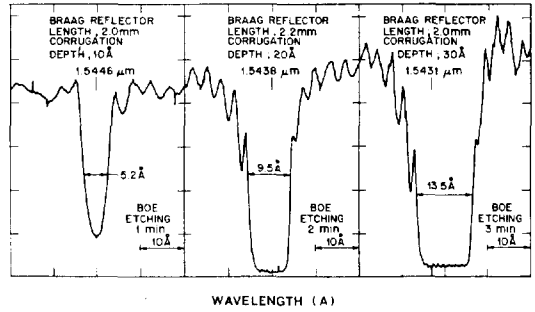


그림 9. Transmission spectrum of Si₃N₄-SiO₂ waveguide Bragg reflector for variation of the depth of grating.

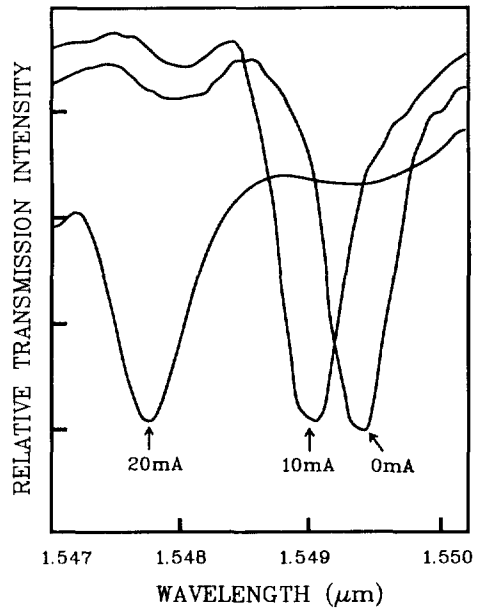


그림 10. Transmission spectrum of tunable waveguide Bragg filter for variation of heater current.

변화시켜 측정치에 근접하도록 위로 이동시키고 이를 그림에 파선으로 나타내었다. 측정치와 계산치 곡선의 기울기를 비교하면 rib의 높이는 13 nm임을 알 수 있다.

그림 9는 SiO₂ 덮개층이 1 μm 인 매립 브래그격자 도파로의 격자길이에 따른 파장스펙트럼이다. 브래그필터의 대역폭은 Si₃N₄의 식각시간에 따라 비례하여 변함을 알 수 있다. 식각이 불균일할 경우 반사대역폭의 커지거나 일그러짐(chirping)이 일어나는데 그림 9를 보면 1 nm 이상을 식각할 경우 이런 현상이 거의 없음을 알 수 있다.

3. 가변 브래그필터 도파로

그림 10에 DC 전류의 변화에 따른 브래그필터의 스펙트럼 변화를 측정하였다. 브래그파장은 전류의 제곱에 비례하여 단파장 쪽으로 이동하였고, 이동량은 10 mA의 전류에 대해 0.41 nm이다. 따라서 이로부터 전류의 제곱 즉 전력(power)에 비례하여 온도가 증가하고 온도에 반 비례하여 silicone rubber의 굴절률이 감소하며 식 (8)로부터 silicone rubber의 굴절률 감소에 비례하여 모우드굴절률 또는 브래그 파장이 감소함을 알 수 있다. 이러한 모우드굴절률의 변화로부터 II장의 이론계산방법으로 덮개층의 굴절률 변화량을 계산하고 이로부터 전류주입에 따른 도파로의 온도변화를 계산하였다. 그 결과 10 mA 전류에 대해 2.7°C의 온도가 상승됨이 계산되었다.

브래그필터의 시간 응답특성은 800 ms 정도로서 매우 느렸다. 이 사실은 히터와 도파로간 거리가 100 μm 임에 비해 히터와 실리콘 기판은 5.5 μm 로서 매우 작고, 따라서 발열의 대부분이 실리콘과 silicone rubber로 이동되며, 도파로가 기판과 클래드의 온도에 의하여 영향을 받음을 시사한다. 이러한 열 전달과정은 실리콘 기판과 silicone rubber의 열 용량에 관계되며 비능률적이고 응답특성 또한 느리다. 이 문제는 히터와 도파로 간의 공간적 배열을 개선함으로써 해결할 수 있으리라 생각된다.

IV. 결과 및 검토

$\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$ rib 도파로에 매립된 형태의 브래그필터를 제작하였다. 도파로의 구조에 따른 모우드굴절률, Si 기판에 의한 방사손실률, 단일모우드 설계조건 및 브래그 격자의 결합상수 등을 계산하였다. 파장스펙트럼 측정으로 도파로의 구조에 따른 모우드굴절률을 구하여 계산결과와 비교하여 보았으며 그 결과 잘 일치하였다. 또한 브래그반사의 대역폭과 브래그격자의 깊이와의 관계를 조사하였으며 그 결과 BOE에 의한 Si_3N_4 의 식각은 수 nm의 미세한 식각에도 사용될 수 있음을 보였다. 미세 히터박막과 silicone rubber를 사용하여 필터파장의 가변 또는 스위칭이 가능한 도파로 브래그필터를 제작하였으며 그 특성을 조사한 결과 브래그파장은 전류의 제곱에 비례하여 단파장 쪽으로 이동하였고 10 mA의 전류에 대해 0.41 nm의 파장가변률을 얻었다. 여기서 필터파장의 편위가 전류의 제곱에 비례하므로 실제 응용상 문제가 될 수도 있으나 이 점은 연산중폭기 등을 사용하여 해결할 수 있을 것이다. 그리고 필터파장의 스위칭 속도는 0.8 s 정도로서 낮으나 히터와 도파로간의 공간적 배열을

개선하면 그 속도가 훨씬 빨라지리라 생각된다. 이러한 소자는 반도체레이저의 외부 도파로 공진기(external waveguide resonator feedback)로서 이용되어 코헤런트 광통신용 광원으로 사용될 수 있고, 또한 WDM 광집적 회로의 채널선국 또는 파장 스위칭 등에도 이용될 수가 있다.

참 고 문 헌

- [1] Pochi Yeh and H. F. Taylor, "contradirectional frequency-selective couplers for guided-wave optics", *Appl. Opt.* **19**, 2848 (1980); R. R. A. Syms, "Optical Directional Coupler with a Grating Overlay", *Appl. Opt.* **24**, 717 (1985).
- [2] N. A. Olsson, C. H. Henry, *et. al.*, "Narrow Line-width 1.5 μm semiconductor laser with a resonant optical reflector", *Appl. Phys. Lett.* **51**, 1141 (1987); D. A. Ackerman, M. I. Dahbura, *et. al.*, "Compact hybrid resonant optical reflector lasers with very narrow linewidths", *Appl. Phys. Lett.* **58**, 449 (1991).
- [3] C. H. Henry, R. F. Kazarinov, H. J. Lee, K. J. Orlowsky, and L. E. Katz, "Low Loss $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$ Optical Waveguides on Si", *Appl. Opt.* **26**, 2621 (1987).
- [4] H. J. Lee, C. H. Henry, R. F. Kazarinov, and K. J. Orlowsky, "Low Loss Bragg Reflectors on $\text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$ Rib waveguide", *Appl. Opt.* **26**, 2618 (1987).
- [5] M. B. J. Diemeer and W. J. de Vries, "Fused Coupler Switch using a Thermo-optic cladding", *Elect. Lett.* **24**(8), 458 (1988).
- [6] M. Haruna and J. Koyama, "Thermooptic Deflection and Switching in Glass", *Appl. Opt.* **21**(19), 3461 (1982).
- [7] M. J. Adams, *An Introduction to Optical Waveguides* (John Wiley & Sons, New York, 1981), pp. 188-198.
- [8] K. H. Schlereth and M. Tacke, "The Complex Propagation Constant of Multilayer Waveguides: An Algorithm for a Personal Computer", *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-26**, 627 (1990).
- [9] Amnon Yariv and Pochi Yeh, *Optical Waves in Crystals* (John Wiley & Sons, New York, 1984), pp. 425-439.
- [10] S. L. McCall and P. L. Platzman, "An Optimized $\pi/2$ Distributed Feedback Laser", *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-21**, 1899 (1985).

- [11] H. J. Lee, N. A. Olsson, "Narrowband Bragg Reflector Filter at $1.52 \mu\text{m}$ ", *Appl. Opt.* **27**, 211 (1988).

Tunable Bragg Filter of $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$ Waveguide Using Thermo-optic Effect

Hyung Jong Lee

Department of Physics, Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea

Hwanjae Jung

Department of Physics Education, Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea

(Received: October 12, 1992)

Buried Bragg filters of single mode Si_3N_4 rib waveguide with a cover layer of SiO_2 and grating at the interface of Si_3N_4 and SiO_2 are designed and fabricated. Etching of the grating on Si_3N_4 waveguide core by buffered HF showed uniform etching with good control up to 1 nm. This buried type of Bragg filters are immune to contamination of the surface of device. The mode index and bandwidth of filters are determined by measurements of the transmission spectrum of Bragg filters and compared with that of calculation. Waveguide Bragg filters loaded with the micro-heater of Cr film and the cladding of silicone rubber are made to control the Bragg wavelength of the filter. As a result the filter wavelength of the device moved by 0.41 nm for 10 mA current to the shorter side of wavelength proportional to the square of the current.