

좁은 파장대역폭을 갖는 격자도움형 방향성 결합기 필터의 제작과 특성측정

김덕봉 · 박찬용 · 김정수 · 이승원 · 오광룡 · 김홍만 · 편광의

한국전자통신연구원 화합물반도체연구부

윤 태 훈

부산대학교 전자공학과

(1996년 12월 30일 받음)

InGaAsP/InP 격자도움형 방향성 결합기(GACC)필터를 제작하고, 필터의 도파로 구조에 대해서 중심파장, 파장대역폭, TE/TM 편광의존성 그리고 파장가변특성 등을 측정하였다. 필터가 좁은 파장대역폭을 갖도록 도파로의 구조를 설계하였다. 균일한 두께와 폭을 갖는 도파로를 제작하기 위해 reactive ion etching 방법을 이용하였다. 제작된 InGaAsP/InP GACC 필터의 출력 스펙트럼은 TM 편광에서 1494.0 nm의 중심파장과 1.3 nm의 파장대역폭을 가졌고, TE 편광에서는 1530.6 nm의 중심파장과 1.5 nm의 파장대역폭을 보였다. 이 파장대역폭은 지금까지 보고된 1.5 μm 파장대역 부근에서 GACC 필터가 갖는 대역폭 중 가장 좁은 것이다. 또한 100 mA의 전류인가에 대한 8 nm 정도의 중심파장 이동을 관찰하였다. 그리고 제작된 여러 가지 도파로 구조에 대해 측정한 GACC 필터의 동작특성과 계산한 결과가 잘 일치함을 보였다.

I. 서 론

대용량의 자료를 전송할 수 있는 WDM(Wavelength Division Multiplexing) 시스템의 전송량은 동시에 전송할 수 있는 채널의 개수에 좌우된다. 고밀도로 많은 WDM 채널을 수용하는 광통신시스템에는 필터의 좁은 파장대역폭이 중요한 역할을 한다. 그러므로 필터의 동작특성은 WDM 시스템의 성능을 결정하는데 매우 중요한 부분을 차지한다. 방향성 결합기 필터는 비대칭성을 갖는 두 도파로를 이용하여, 한 도파로로 입력되는 임의의 파장 중 두 도파로에서 같은 위상변이를 가지는 파장만 결합하여 다른 쪽 도파로로 출력하는 파장 선택성을 갖는다. InP 기판 위에 성장된 격자도움형 InGaAsP/InP 방향성 결합기 필터(InGaAsP/InP Grating Assisted Codirectional Coupler filter, 이하 GACC 필터)는 매질의 성분을 조정하여 도파로 층의 굴절을 차이를 조절할 수 있어, 원하는 중심파장과 파장대역폭을 얻을 수 있다. 또한 전류를 인가하여 넓은 영역에서 파장가변이 가능하고, 도파로 구조를 조절하여 편광의존성을 조절할 수 있다. 그리고 발광 및 수광소자 등 다른 소자와 한 기판 위에 집적하기 용이한 점 등을 가지고 있어 많이 연구되어 왔다.^[1] 최근에는 1.55 μm에서 중심파장을 갖는 GACC 필터에 대해 많은 연구가 이루어지고 있는데, 1.5 nm의 파장대역폭을 갖는 필터가 가장 좋은 결과로 알려져 있다.^[2] 그러나 GACC 필터는 중심파장과 파장대역폭이 도파로의 구조의 변화에 대해 민감한 성질을 가진다. 특히 중심파장은 도파로의 두께와 폭 그리고 매질의 굴절을 변화에 따라, 넓은 파장영역에서 움직인다.^[3] 그러므로 원하는 중심파장과 파장대역폭을 갖는 GACC 필터를 제작하기 위해서는 정확하게 도파로 구조를 설계하는 기술과 설계된 구조를 정확히 구현할 수 있는 공정기술을 보유해야 한다. 이를 위해 도

파로 구조의 변화에 대한 동작특성의 변화 경향을 알고, 이를 설계와 제작에 적용하는 것이 중요하다.

본 논문에서는 1.5 μm 파장대역에서 동작하는 InGaAsP/InP GACC 필터를 설계 및 제작하고, 중심파장, 파장대역폭, TE/TM 편광의존성 그리고 파장가변범위 등 필터의 동작특성을 측정하였다. 제작된 GACC 필터의 중심파장이 1.5 μm 파장대역에 있고 1.5 nm의 파장대역폭을 가지는 것을 확인하였다. 그리고 여러 가지 도파로 구조를 갖는 GACC 필터의 측정된 동작특성을 이용하여 도파로 구조변화에 대한 필터의 동작특성변화 경향을 살펴보았다. 이를 이용하여 InGaAsP/InP GACC 필터의 설계에 이용한 시뮬레이션과 제작공정의 정확성을 확인할 수 있었다.

II. 동작원리 및 설계

GACC 필터는 그림 1과 같이 수직방향으로 성장된 비대칭성을 갖는 두 도파로를 이용하여, 한 도파로에 입력된 임의의 파장 중 GACC 필터의 위상조건^[4]

$$\beta_1(\lambda_c) - \beta_2(\lambda_c) = 2\frac{\pi}{\Lambda} \quad (1)$$

을 만족하는 파장의 빛만 다른 쪽 도파로로 결합하는 성질을 이용한 필터이다. 여기서 λ_c 는 중심파장이고 $\beta(i=1,2)$ 는 도파로의 전파상수 그리고 Λ 는 격자의 주기이다. 전파상수 β_i 는 $2\pi n_{i,eff}/\lambda_0(i=1,2)$ 로 표현되는데, λ_0 는 자유공간에서 빛의 파장이고 $n_{i,eff}$ 는 각 도파로의 유효굴절률이다. 그림 2는 GACC 필터의 결합원리를 살펴보기 위해 중심파장에서 두 도파로를 진행하는 빛의 위상상태를 계산하여 그림으로 나타낸 것이다. 그림 2(a)에서 중심파장을 갖는 빛은 두 도파로에서 전파

상수가 달라, 도파로를 진행하면서 서로 다른 위상을 가진다. 따라서 그림 2(b)처럼 두 도파로를 진행하면서 동위상(보강간섭)과 반대위상(상쇄간섭)을 갖는 부분이 발생한다. 이때 그림 2(c)와 같이 식(1)을 만족하는 주기를 갖는 격자에 의해, 두 도파로를 진행하는 빛이 같은 위상을 갖는 곳에서는 큰 결합상수를 가지고, 반대의 위상을 갖는 곳에서는 작은 결합상수를 가지게 된다.^[5] 그러므로 상쇄간섭보다 큰 보강간섭이 발생하여 두 도파로간에 빛이 교환된다. 입력 빛의 파장이 중심 파장을 벗어나면 격자의 위상과 보강 및 상쇄간섭을 일으키는 곳의 위상이 차이를 가지므로 동일한 결합상수를 갖는 상쇄간섭과 보강간섭에 의해 두 도파로 사이에는 빛이 교환되지 않는다. 따라서 GACC필터는 중심파장만 다른 쪽 도파로에 결합되는 파장선택성을 가진다.

WDM시스템에서 통신용량은 채널의 수에 비례하고, 고밀도로 많은 WDM채널을 수용하는 광통신시스템에는 필터의 좁은 파장대역폭이 중요한 역할을 한다. 따라서 필터가 좁은 파장대역폭을 가지는 것이 중요하다. GACC필터에서 파장대역폭은 중심파장에서 두 도파로의 유효굴절율의 기울기 차이

$\sigma = (dn_{1,eff}/d\lambda - dn_{2,eff}/d\lambda)_{\lambda=\lambda_c}$ 와 빛이 완전히 결합되는 도파로의 최소길이 L_c 에 의해

$$\frac{\Delta\lambda_{BW}}{\lambda_c} = 0.8 \frac{\Lambda}{L_c} \frac{1}{1 - \sigma\Lambda} \quad (2)$$

와 같이 결정된다.^[4] GACC필터가 좁은 파장대역폭을 갖기 위해서는 식(2)에서 L_c 와 σ 가 커져야 한다. 입력되는 빛의 파장이 중심파장 근처이면 격자의 위상과 상쇄 및 보강간섭을 일으키는 곳과의 위상차이가 작다. 그러므로 여전히 보강간섭될 때 결합상수가 더 커 도파로간에 빛이 교환된다. 그러나 필터의 완전결합길이 L_c 가 길어지면 출력단 쪽에서 이들 사이의 위상차이가 점점 커지게 된다. 따라서 보강간섭과 상쇄간섭의 총량이 같은 크기를 가지게 되고, 두 도파로 사이에서 교환되는 빛의 양이 줄어 파장대역폭은 감소한다. 그러므로 GACC필터의 파장대역폭은 완전결합길이 L_c 와 반비례 관계를 가진다. 완전결합길이 L_c 는 도파로간에 빛이 결합되는 세기와 관계하므로 도파로간의 거리와 격자의 위치 그리고 두께에 의해 결정된다. 완전결합길이 L_c 를 증가시키려면 도파로 사이의 거리를 멀리하거나 격자의 두께를 감소시키면 된다. 그러나 완전결합길이 L_c 는 소자의 길이와 직접적인 관계가 있어 L_c 를 증가시키는데 한계가 있다. 한편, 두 도파로의 전파상수의 기울기 차이가 커질수록 중심파장을 조금만 벗어나도 두 도파로를 진행하는 빛의 위상차이의 변화가 커지게 되므로 격자의 위상과 상쇄 및 보강간섭을 일으키는 곳과의 위상차이가 크게 변한다. 그리고 동일한 크기의 상쇄 및 보강간섭이 발생하여 다른 쪽 도파로에 결합되는 빛의 양이 줄어든다.

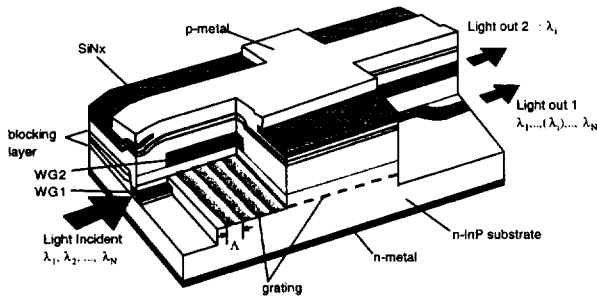


그림 1. InGaAsP/InP GACC필터의 구조.

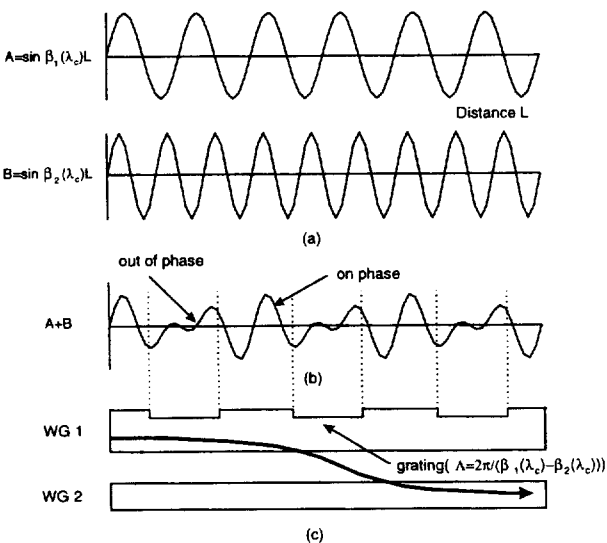


그림 2. GACC필터의 동작원리. (a)는 중심파장을 갖는 빛이 비대칭성인 두 도파로를 진행할 때 위상상태를 나타내고 (b)는 두 도파로를 진행하는 빛의 동위상과 반대위상을 나타냈다. (c)에서 격자주기가 식(1)을 만족할 때 보강간섭의 결합상수가 커짐을 알 수 있다.

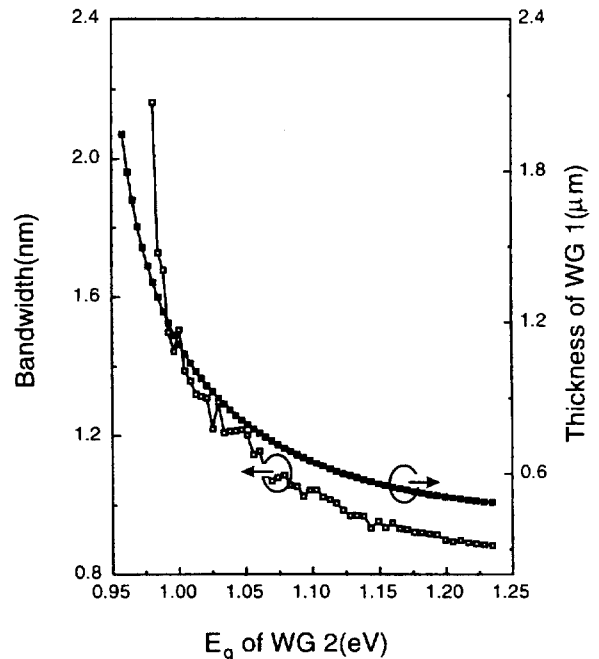


그림 3. GACC필터의 도파로 구조에 대한 파장대역폭의 변화. 아래쪽 도파로의 bandgap 에너지는 0.93 eV로 두고 위쪽도파로의 두께를 0.4 μm 로 두었다. 완전결합길이는 5 mm이다.

따라서 유효굴절율의 기울기 차이 σ 가 커지면 파장대역폭이 감소한다. 도파로의 유효굴절율은 도파로의 구조에 대한 함수이므로 도파로의 굴절율이나 폭, 두께를 바꾸어 σ 의 크기를 증가시킬 수 있다. 이때 도파로의 구조가 바뀌면 식(1)에 의해 중심파장이 이동하므로 이를 고려해야 한다.^[6]

도파로 구조에 대한 InGaAsP/InP GACC필터의 파장대역폭을 계산하여 그림 3에 나타냈다. 계산에 이용한 InGaAsP/InP의 굴절율은 참고문헌^[7]을 참고하였다. 필터의 중심파장이 1.55 μm 가 되도록 도파로를 구성하고, 도파로 사이의 거리를 조정하여 각 구조의 완전결합길이가 5 mm가 되도록 하였다. GACC 필터가 동일한 길이를 가지더라도, 도파로의 구조에 따라 σ 값이 달라져 파장대역폭이 0.9-2.2 nm사이에서 변하는 것을 알 수 있다. 그러므로 GACC필터가 허용되는 최대의 도파로 길이를 가질 때, 도파로를 잘 구성하여 σ 가 최대한 큰 값을 갖도록 하면 좀 더 좁은 파장대역폭을 얻을 수 있다.

실제 제작을 위한 도파로 층의 설계는 그림 3을 참고하여 아래쪽 도파로의 폭, 두께, 그리고 bandgap 에너지가 $w_1=1.5 \mu\text{m}$, $t_1=0.5 \mu\text{m}$, $E_{g1}=0.93 \text{ eV}$ 을 갖도록, 위쪽 도파로가 $w_2=2 \mu\text{m}$, $t_2=0.4 \mu\text{m}$, $E_{g2}=1.2 \text{ eV}$ 를 갖도록 InGaAsP/InP GACC필터를 설계하였다. 여기서 두 도파로 사이에 위치한 격자층은 아래쪽 도파로와 같은 bandgap 에너지를 갖는 InGaAsP로 설계하였으며 두께는 600 Å, 주기는 13 μm 로 설계하였다. 제작된 필터는 1.55 μm 에서 중심파장을 갖고 1 nm이하의 파장대역폭을 가질 것으로 예측되었다.

III. 제작 및 측정

InGaAsP/InP GACC필터의 도파로는 BH(buried heterojunction)구조로 제작하였다. 도파로의 길이가 5 mm 정도로 길기 때문에 산란손실이 작아야 하고, 파장가변을 위한 전류를 인가할 때 캐리어를 도파로 내에 한정하는데 BH 구조가 용이하기 때문이다.^[8] 또한 두 도파로가 2 μm 내외의 매우 가까운 거리로 인접하므로 crosstalk의 감소 및 측정상의 편리를

위해 그림 1에서 보는 바와 같이 아래쪽 도파로의 끝단에 bending을 가하고 위쪽 도파로의 입력단을 200 μm 정도의 길이 만큼 제거하였다. 도파로의 식각은 도파로의 균일성을 위해 두 도파로 모두 CH_4/H_2 반응가스를 이용한 RIE(Reactive Ion Etching)방법을 사용하였다. 그리고 파장가변을 위해 위쪽 도파로에 p-n접합구조를 만들었고, 주입되는 전류를 도파로에 한정시키기 위해 n-p-n blocking층을 성장시켰다. 결정의 성장 및 재성장 공정은 모두 MOVPE(Metal Organic Vapor Phase Epitaxy)방법을 이용하였다.

그림 4는 제작된 GACC필터의 단면 SEM사진이다. 위쪽 도파로의 폭, 두께가 1.7 μm , 0.3 μm 이고 아래쪽 도파로가 1.2 μm , 0.45 μm 이다. 제작된 GACC필터는 공정상의 오차에 의해 설계된 구조와 오차를 가진다. 중심파장과 파장대역폭을 측정하기 위해, 아래쪽 도파로로 빛을 입력하여 위쪽 도파로로 출력된 빛의 스펙트럼을 측정하였다. 광원으로 파장가변레이저(HP8168F: 1450-1580 nm)를 사용했고, 필터의 입력단과 출력단에 각각 tapering된 광섬유를 이용하여 빛을 결합시켰다. 먼저 중심파장을 찾기 위해 아래쪽 도파로로 입력시키는

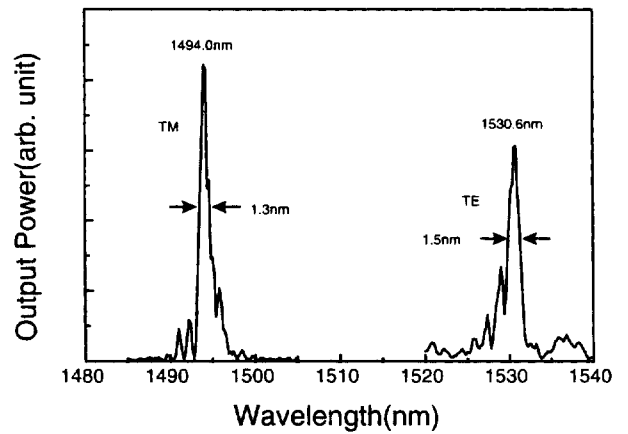


그림 5. 측정된 GACC필터의 출력 스펙트럼. 위쪽 도파로의 폭과 두께가 2.7 μm , 0.3 μm 이고 아래쪽 도파로가 2.2 μm , 0.45 μm 인 GACC필터의 출력스펙트럼을 측정하였다.

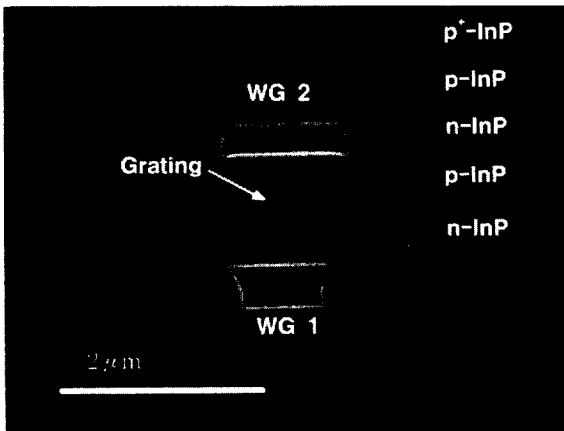


그림 4. 제작된 GACC필터의 단면사진. 위쪽 도파로의 폭과 두께가 1.7 μm , 0.3 μm 이고 아래쪽 도파로는 1.2 μm , 0.45 μm 인 경우를 나타낸다.

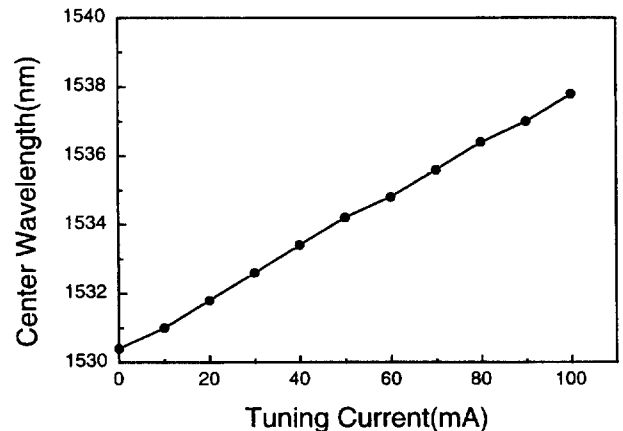


그림 6. 가변전류에 대한 GACC 필터의 중심파장의 변화.

표 1. 측정된 도파로 구조에 대한 GACC 필터의 동작특성.

Separation Distance	Characteristics	Measurement Value(nm)		Calculated Value(nm)	
		Device 1	Device 2	Device 1	Device 2
1.3 μm	Center wavelength(nm)	1486.8	1535.8	1488.4	1539.9
	Bandwidth(nm)	1.5	3.2	1.43	2.15
1.7 μm	Center wavelength(nm)		1530.6		1538.8
	Bandwidth(nm)		1.5		1.5

Device structure $t_1=0.451$, $t_2=0.3$, $\Lambda=13 \mu\text{m}$, $E_{g1}=0.93$, $E_{g2}=1.2 \text{ eV}$, Device 1 : $w_1=1.2$, $w_2=1.7 \mu\text{m}$, Device 2 : $w_1=2.2$, $w_2=2.7 \mu\text{m}$

빛의 파장을 가변 시키면서 위쪽 도파로로 출력되는 빛의 강도를 적외선 카메라로 관찰하였다. 결합이 일어나지 않은 파장에서는 위쪽 도파로에서 빛이 검출되지 않다가 중심파장에 이르면 위쪽 도파로의 빛의 강도는 급격히 커지며 아래쪽 도파로의 빛의 강도는 감소한다. 입력 빛의 파장을 중심파장에 맞춘 후 출력단의 광섬유를 위쪽 도파로에 정렬시키고, 다시 입력파장을 변화시키면서 중심파장 및 파장대역폭 특성을 정밀하게 측정하였다. 그림 4의 GACC필터의 경우 중심파장은 1496.8 nm이고 파장대역폭은 1.5 nm으로 측정되었다. 공정상의 오차에 의해 중심파장이 단파장 쪽으로 이동했고 파장대역폭이 증가하였다. 그림 5에 위쪽 도파로의 폭과 두께가 2.7 μm, 0.3 μm이고 아래쪽 도파로가 2.2 μm, 0.45 μm인 GACC 필터의 출력스펙트럼을 측정하여 나타냈다. 약 36 nm의 간격을 두고 두 개의 피크가 나타났다. BH도파로의 전파상수는 입력 빛의 TE/TM 편광상태에 따라 달라지므로, GACC필터는 입력 빛의 편광상태에 따라 두 개의 중심파장을 가질 수 있다. 광섬유를 통해 필터에 입력되는 빛은 TE/TM편광상태를 동시에 가지므로 측정된 GACC필터의 출력스펙트럼에는 두 개의 피크가 존재한다. TE/TM편광에서 피크의 파장은 1494 nm, 1530.6 nm이고 파장대역폭은 1.3 nm, 1.5 nm이다. 이 파장대역폭은 지금까지 보고된 1.5 μm파장대역 부근에서 GACC필터가 갖는 대역폭 중 가장 좁은 것이다.^[2]

GACC필터의 한쪽 도파로에 전류나 전압을 인가하여 도파로의 굴절율을 감소(또는 증가)시키면, 전파상수가 감소(또는 증가)하여 식(1)에 의해 중심파장의 위치가 장파장이나 단파장 쪽으로 이동한다. 그림 6은 인가전류에 대한 GACC 필터의 중심파장의 이동특성(파장가변특성)을 나타냈다. 약 100 mA의 전류를 인가할 때 중심파장은 8 nm정도 장파장 쪽으로 이동하였다. 중심파장의 이동이 100 mA의 가변전류에서도 포화되지 않고 선형적으로 증가하는 것으로 볼 때, 제작된 GACC필터는 더 넓은 파장가변범위를 가질 것으로 예상된다. 그리고 도파로의 구속계수가 더 큰 아래쪽 도파로에 p-n접합구조를 만들면 인가된 가변전류에 대한 전파상수의 변화량이 더 커지므로, 파장가변범위를 증가시킬 수 있을 것으로 생각된다.

표 1에 도파로 구조변화에 대한 GACC필터 동작특성의 측정결과와 계산결과를 나타냈다. 계산결과와 측정된 결과가 잘 일치함을 보여준다. 도파로의 폭이 넓어질수록 중심파장은 장파장 쪽으로 이동하고, 파장대역폭은 증가한다. 도파로 간격이 멀어질수록 파장대역폭이 감소하고 중심파장도 변하는 것을 알 수 있다. 즉, 표 1에서 GACC필터의 중심파장과

파장대역폭은 도파로의 구조에 민감하게 변하는 것을 확인할 수 있다. 그러므로 정확한 중심파장과 좁은 파장대역폭을 갖는 GACC필터를 제작하기 위해서는 도파로 구조의 변화에 대한 동작특성의 변화 경향을 설계와 제작에 활용해야 한다.

IV. 결 론

InGaAsP/InP GACC필터를 제작하고, 필터의 도파로 구조에 대해서 중심파장, 파장대역폭, TE/TM편광의존성, 그리고 파장가변특성 등을 측정하였다. 제작된 InGaAsP/InP GACC 필터의 출력 스펙트럼은 TM편광에서 1494.0 nm의 중심파장과 1.3 nm의 파장대역폭을 가졌고, TE편광에서는 1530.6 nm의 중심파장과 1.5 nm의 파장대역폭을 보였다. 이것은 1.5 μm파장대역 부근에서 GACC필터가 갖는 대역폭 중 가장 좁은 것이다. 또한 100 mA의 전류인가에 대한 8 nm정도의 중심파장의 이동을 관찰하였다. 그리고 제작된 여러 가지 도파로 구조에 대해 측정된 GACC필터의 동작특성과 계산한 결과가 잘 일치함을 보였다. GACC필터에서 두 도파로의 폭이 넓어질수록 중심파장은 장파장 쪽으로 이동하고, 파장대역폭의 증가한다. 그리고 도파로 간격이 멀어질수록 파장대역폭이 감소하는 경향을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] B. Broberg, B. S. Lindgren, M. G. berg, and H. Jiang, *J. Lightwave Technol.*, **4**, 196(1986)
- [2] F. Heismann, L. L. Buhl, B. I. Miller, M. Newkirk, U. Koren, M. G. Yong, and R. C. Alferness, *Appl. Phys. Lett.*, **64**, 2335(1994)
- [3] Sang-Kook Han, R. V. Ramaswamy, and R. F. Tavlykaev, *J. Lightwave Technol.*, **14**, 77(1996)
- [4] R. C. Alferness, T. L. Koch, L. L. Buhl, F. Storz, F. Heismann, and M. J. R. Martyak, *Appl. Phys. Lett.*, **55**, 2011(1989)
- [5] D. Marcuse, *Theory of dielectric optical waveguides 2nd edition*, (Academic Press, 1991)
- [6] 김덕봉, 박찬용, 김정수, 오광룡, 김홍만, 제 13회 광학 및 양자전자 학술발표회지, **8**(1996)
- [7] C. H. Henry, L. F. Johnson, R. A. Logan, and D. P. Clarke, *IEEE J. Quantum Electron.*, **21**, 1887(1985)
- [8] T. Tamir, *Guided-wave optoelectronics 2nd edition*, (Springer-Verlag, Berlin, 1990)

**Fabrication and characterization of grating-assisted
co-directional coupler wavelength filter in InP**

Dug Bong Kim, Chan Yong Park, Jeong Soo Kim, Seung Won Lee, Kwang Ryong Oh,

Hong Man Kim and Kwang Eui Pyun

Optoelectronics Section, Electronics and Telecommunications Research Institute,

Taejon 305-350, Korea

Tae Hoon Yoon

Dept. of Electronics Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

(Received : December 30, 1996)

We demonstrate the operating characteristics(center wavelength, bandwidth, TE/TM polarization, tuning range) of grating-assisted co-directional coupler(GACC) filter fabricated with InGaAsP compound semiconductor. A design of waveguide structure has been focused on the narrow bandwidth characteristics of the filter. Reactive ion etching technique was employed for the uniform waveguide formation. The bandwidths(FWHM) and center wavelengths of the fabricated GACC filter were measured by 1.5 nm and 1530.6 nm for TE polarization and 1.3 nm and 1494.0 nm for TM polarization. This is the one of the narrowest bandwidth at 1530 nm region ever reported. The center wavelength shifted from 1530 nm to 1538 nm when the current of 100 mA was injected at 4.5 mm-long device. Good agreement between the designed and measured operating characteristics for some waveguide structures is demonstrated.