

논문 2007-44SD-2-7

반 링과 전반사 미러를 이용한 다중모드 간섭기로 결합된 링 공진기

(Multimode interference coupled ring resonator using half ring and total internal reflection mirrors)

김 두 근*, 최 영 완*

(Doo-Gun Kim and Young-Wan Choi)

요 약

본 연구에서는 WDM 시스템의 집적화를 위해서 InP 기반의 신개념의 마이크로 링 공진기 필터를 제안하고, 제작을 통해서 그 특성을 측정 분석하였다. 전반사 미러가 삽입된 구조는 자동 정렬 (Self-Aligned) 공정을 통해서 구현 하였고, 측정된 전반사 미러의 손실은 한 개의 미러당 0.71 dB를 얻을 수 있었다. 마이크로 링 공진기의 결합기로는 다중모드 간섭기를 이용하여 빛이 광도파로를 따라 진행할 때 링으로 결합되는 파워를 높였다. 다중모드 간섭기의 주변을 깊게 에칭을 하여 간섭기의 길이와 폭을 119 μm 와 9 μm 로 하였다. 링 공진기 내부의 광도파로와 전반사 미러에서의 손실을 보상하기 위해서 링 공진기 내부에 길이가 190 μm 인 반도체 광 증폭기를 집적하였다. 이때 얻어진 FSR는 대략 1.333 nm (162 GHz)이고 소광비는 13 dB이다.

Abstract

We have fabricated and characterized MMI (Multimode Interference) coupled ring resonator with the total internal reflection mirrors and the semiconductor optical amplifier for the integration of the WDM (Wavelength Division Multiplexing) system. The TIR (Total Internal Reflection) mirrors were fabricated by self-aligned process and had losses of about 0.71 dB per mirror. Coupling in and out of a resonator was achieved using the extremely small MMI couplers. The MMI length and width used in the experiment were 119 μm and 9 μm , respectively. The resulting FSR (Free Spectral Range) and on-off ratio were approximately 1.333 nm (162 GHz) and 13 dB, respectively.

Keywords: 전반사 미러 (Total Internal Reflection Mirror), 다중모드 간섭기 (Multimode Interference), 반도체 광 증폭기 (Semiconductor Optical Amplifier), 마이크로 링 공진기 (Micro Ring Resonator)

I. 서 론

WDM 광통신에서는 여러 파장의 신호를 하나로 결합시켜주고, 분리시켜주는 멀티플렉서(Multiplexer), 디멀티플렉서(Demultiplexer) 그리고 특정 파장을 선택할

수 있는 파장가변 필터 등이 필수적이다.^[1] 이러한 파장 다중방식을 효율적으로 충분히 활용하기 위해서는 laser의 파장 안정화와 광 감쇠기, optical isolator, circulator 및 파장가변 필터 등의 집적화가 요구된다.^[2] 파장가변 필터 소자로는 지금까지 많은 방법이 시도되었지만, 이러한 집적화를 위해서는 InP 기반의 도파로형 필터가 필수적이라 생각된다. 링이나 디스크 같은 잘 알려진 마이크로 공진기 소자는 이러한 시스템 집적화에 다양한 기능을 제공할 수 있는 소자이다. 마이크로 링 공진기는 콤팩트하고 높은 파장 선택성과 집적도를 높일 수 있는 특성을 가지고 있다. 또한 마이크로 공

* 정회원, 중앙대학교 전자전기공학부 전파광파통신 연구실

(Microwave and Lightwave Telecommunications Lab. Chung-Ang University)

※ 본 논문은 2005년도 중앙대학교 신진우수연구자 지원 사업에 의하여 연구되었음.

접수일자: 2006년10월2일, 수정완료일: 2007년1월12일

진기 필터는 다른 필터와 비교해서 소자 크기가 매우 작고, 많은 수의 공진기 필터를 On-chip에 집적할 수 있다. 이러한 이유로 아직도 세계 많은 연구진에 의해서 깊이 있게 연구되어 지고 있다.^[3]

InP 기반의 도파로를 이용해서 excessive radiation loss 없이 반경이 작은 링을 만들기 위해서는 광도파로 주변을 깊게 에칭을 해야 하는데, 이렇게 광도파로 주변을 깊게 에칭을 하면 도파로의 측면 광가둠 효과를 높일 수 있지만, sidewall roughness는 광 전파 손실을 증가시킨다. 따라서 마이크로 링 공진기의 내부를 반링과 전반사 (Total Internal Reflection: TIR) 미러로 구성한다면 콤팩트한 공진기를 구현할 수 있다. 그리고 빛이 광도파로를 따라 진행할 때 링 공진기로 결합되는 결합기를 방향성 결합기인 측면 결합으로 할 경우, 측면 결합의 간격이 서브 마이크로미터가 요구된다.^[4] 이러한 결합기의 서브 마이크로미터 간격은 공정의 재연성을 어렵게 만든다. 그러나 측면 결합기를 다중모드 간섭기로 이용하게 되면 링으로 결합되는 파워를 크게 할 수가 있고, 공정의 재연성을 높일 수가 있다.

본 연구에서 마이크로 링 공진기는 반 링과 전반사 미러를 이용하여 링의 전체 길이를 줄였고, 광도파로에 광 증폭기를 삽입하여 광도파로와 미러에서 발생하는 손실을 극복하였다. 링 공진기의 결합기로는 극히 작은 다중 간섭기를 이용하여 링의 전체 길이를 줄였고 빛이 광도파로를 따라 진행할 때 링으로 결합되는 파워를 높였다.

II. 링 공진기의 구성

1. 자동 정렬된 전반사 미러

가. 전반사 미러의 구조적 최적화

아주 콤팩트한 링 공진기는 광도파로에 전반사 미러를 삽입함으로써 구현될 수 있다. 그러나 InGaAsP 물질에서 손실이 적은 전반사 미러를 실현하기 위해서는 첫 번째로 제작 공정이 self-aligned 되어야 한다. 즉, 입출력 광도파로와 미러 계면과의 offset을 정확히 하기 위해서, 1차 마스크 공정에서 입출력 광도파로와 미러 블록을 동시에 패터닝을 해야 한다. 다음 식각 공정에서 광도파로가 싱글모드가 나올 정도까지 식각을 하고, 2차 마스크 공정에서 미러 부분만 오픈을 한다. 마지막으로 오픈된 미러 부분을 깊게 식각을 해서 전반사 미러를 완성한다. 이렇게 하면 광도파로와 미러의 misalignment

에 따른 부가적인 손실을 제거할 수 있다.^[5] 두 번째로 구조적인 최적화가 필요하다. 반도체에서 전반사 미러는 광도파로를 깊게 에칭을 해서 만들어지는데, 이때 반도체와 공기면의 입체각은 17° 이다. 일반적으로 평면파가 전반사 미러를 통해 반사될 경우, 반사계수의 진폭은 변하지 않지만 일정한 위상차를 갖는다는 것은 잘 알려져 있다. 이러한 위상차는 평면파가 굴절률이 큰 물질에서 작은 물질로 진행할 때, 굴절률이 작은 바깥쪽 물질 쪽으로 약간의 투과를 하게 되기 때문이다. 그런데 이것은 광 굴절률과 파장, 그리고 입사되는 각에 따라서 달라진다. 이러한 위상차이 때문에 그림 1의 왼쪽에서 나타내는 것처럼, 굴절률이 높은 물질에서 전반사를 겪은 평면파는 실제로 존재하는 물리적인 계면보다 조금 바깥쪽에 완전한 미러로부터 반사를 했다고 생각되어 질 수 있다. 따라서 실제 전반사 미러를 디자인할 때 물리적인 계면을 약간 안쪽으로 해야 한다. 하지만 최적의 전반사 미러 위치를 고려했다고 해도 다음과 같은 이유로 인해서 항상 기본적인 광 손실이 존재한다. 비록 광도파로의 모드가 평면파와는 다르지만, 광도파로 모드는 주파수 분해를 통해서 평면파의 성분으로 표현될 수 있다. 그림 1의 오른쪽에 보이는 것처럼 광모드가 미러 영역으로 들어가게 되면, 평면파의 각각의 성분들은 다른 방향으로 진행하게 된다. 결과적으로 모든 평면파의 성분들이 전반사를 겪는 것은 아니고, 실제적인 미러 위치는 각각의 평면파에 따라 변하게 된다. 따라서 전반사를 겪은 평면파의 성분들은 전부가 똑같이 측면 이동을 경험하게 되는 게 아니고, 약간의 주파수 성분들은 출력 광도파로를 놓치게 된다. 즉, 입력 광 도파로의 전체 주파수 성분을 출력 광도파로로 전반사 시키는 것은 원칙적으로 불가능하다는 것을 말해준다. 따라서 언제나 기본적인 광 손실은 존재한다. 그러나 광모드가 작게 가두어 지는 도파로에서는 주파수 성분이 좁은 영역에 걸쳐 있어서 광 손실을 아주 작게 유지할 수 있다. 그림 2는 도파로 사이에 미러를 삽입한 구조로, 전반사 미러의 계면 위치를 가변 시켰을 때, 광 손실을 유한 차분 시간 영역(FDTD: Finite Difference Time Domain) 방법을 이용해서 계산한 결과이다. 이때 이용된 도파로 구조는 그림 3과 같다. 그리고 입출력 도파로의 폭은 $3 \mu\text{m}$ 이고, 미러 영역의 수직과 수평 방향의 크기는 $8 \mu\text{m}$ 이다. 그림 2의 내부에 삽입된 그림은 광모드가 입력되어 전반사 미러를 경험하고 출력되는 것을 나타낸다. 미러 계면의 offset의 방향은 바깥쪽이 플러스이고 안쪽이 마이너스를 의미한다. 미러 계면의 최적의 offset은 미러 계면

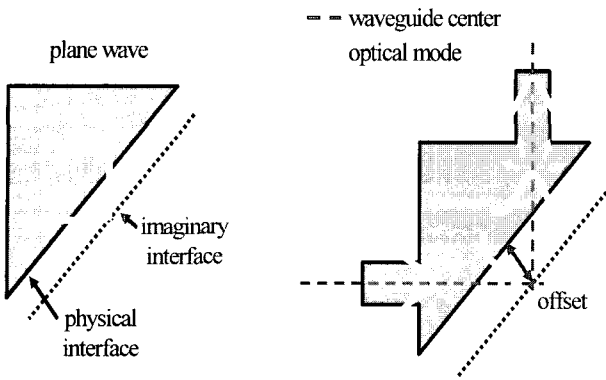


그림 1. 반도체 전반사 미러 디자인을 위한 개략도
Fig. 1. Fundamental issue for designing semiconductor TIR mirrors.

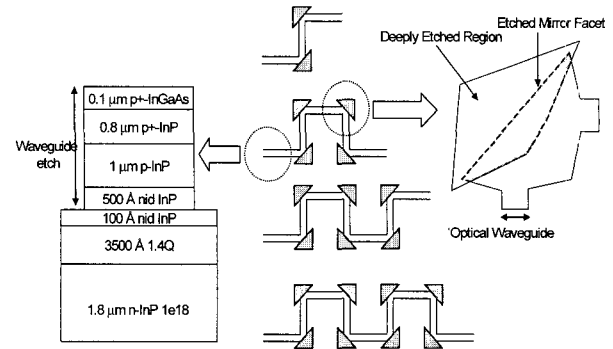


그림 3. 실험 제작에 사용된 전반사 미러의 개략도와 광도파로의 구조

Fig. 3. Cross sectional profile of the optical waveguide as well as the top schematic of the TIR mirrors used in the experiments.

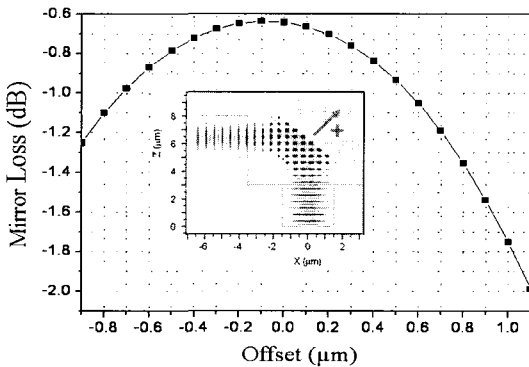


그림 2. 도파로 사이에 있는 미러의 손실
Fig. 2. Mirror loss for corner reflector.

이 안쪽으로 0.1 μm 들어갔을 때 최소의 미러 손실을 갖는다. 이때의 미러 손실은 대략 0.64 dB/mirror 이다.

나. 전반사 미러의 제작 및 측정

그림 3의 왼쪽은 실제 실험에 사용될 광도파로의 구조이고 가운데는 전반사 미러의 윗면을 2개에서 8개까지 나타낸다. 오른쪽에 미러의 확대된 그림은 자동정렬 공정에 사용된 광도파로 마스크와 깊게 에칭될 부분을 나타내는 마스크를 보여준다. 미러의 제작은 PECVD를 이용해서 웨이퍼에 SiN_x를 120 nm 증착하였다. 이렇게 증착된 웨이퍼를 가지고 리소그래피 공정을 이용해서 패턴을 형성하였다. 이때 패턴은 자동 정렬 방법을 이용해서 광도파로와 미러 부분이 한꺼번에 형성이 된다. 패턴이 형성된 웨이퍼를 CF₄ 플라즈마를 이용해서 SiN_x를 에칭하고, photoresist를 제거하면 SiN_x로만 패턴이 형성된다. SiN_x로만 패턴이 형성된 웨이퍼를 RIE 장비를 이용해서 1.85 μm까지 에칭을 하면 광도파로와 미러를 동시에 형성할 수 있다. 이때 RIE 장비의 공정 변수는 CH₄:H₂:Ar(4:20:10 sccm)이고, 챔버의 압력은 75

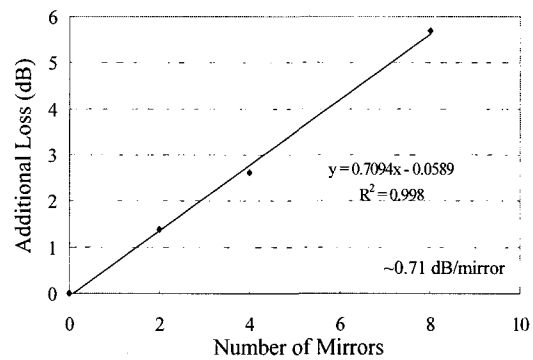


그림 4. 전반사 미러의 부가적인 손실
Fig. 4. Additional loss of total internal reflection mirror.

mT, 파워는 130 W이다. 광 도파로의 폭은 3 μm이다. 첫 번째 에칭의 목적은 광 도파로가 싱글모드가 되도록 에칭을 하는 것이기 때문에 미러가 깊게 에칭 되지 않은 상태이다. 그러나 미러 면에서 광 모드를 충분히 커버하기 위해서는 미러 부분을 깊게 에칭을 해야 한다. 따라서 미러 부분을 깊게 에칭을 하기 위해서는 E-beam 증착 장비를 이용해서 SiO₂를 300 nm 증착을 한 후, lift-off 방법으로 미러 부분만 SiO₂를 제거한다. 이렇게 형성된 패턴을 RIE 장비를 이용해서 미러 부분을 4.5 μm까지 에칭을 한다. 마지막으로 HF를 이용해서 SiN_x와 SiO₂를 완전히 제거한다.

그림 4는 전반사 미러의 개수에 따른 부가적인 손실을 측정된 결과이다. 전반사 미러의 부가적인 손실을 알기 위해서 우선 일반적인 광도파로의 손실을 측정하였다. 이렇게 측정된 광도파로 손실을 가지고 전반사 미러에서 측정된 손실과 비교하였다. 측정된 손실은 한 개의 미러당 0.71 dB정도 이다. 이 결과는 계산 결과에 근접한 값을 알 수 있다. 이러한 낮은 미러 손실은 최적화된 미러의 설계와 에칭 단면을 깨끗하게 할 수 있

는 RIE 공정 조건을 얻었기 때문에 가능한 것으로 본다. 1 dB보다 적은 미러 손실은 실제적인 마이크로 공진기 필터를 가능케 하리라 본다.

2. 다중모드 간섭 결합기

다중모드 간섭 결합기는 콤팩트한 광집적 회로를 위해 아주 중요한 소자이다. 다중모드 간섭 결합기의 기본 원리는 self-imaging이다. 즉 다중모드 간섭 결합기로 입사된 광 모드가 도파로를 따라 진행하면서 주기적인 간격으로 싱글이나 멀티 이미지를 재생하는 것을 말한다.^[6] 본 연구에서 마이크로 링 공진기 필터에 적용하기 위해서 50 %가 결합되는 2x2 다중모드 간섭 결합기를 선택하였다. 그러나 실제적인 결합률은 전파 손실, 광모드 불일치 등으로 인해서 50 %가 되지 않는다. 따라서 2x2 다중모드 간섭 결합기의 초기 디자인 값을 알기위해서 간단하게 수식적인 접근을 하였다. 계단형 다중모드 도파로에서 폭이 W_{MMI} 이고 굴절률이 n_r 일 때, 전파상수 β_0 는 아래와 같이 나타내어진다.

$$k_y^2 + \beta_z^2 = k_0^2 n_r^2 \quad (1)$$

이때,

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}, \quad k_y \approx \frac{(v+1)\pi}{W_e} \quad (2)$$

여기서 W_e 는 도파로 경계면에서 Goos-Hahnchen shift에 의해서 모드 필드의 측면 투과 깊이가 고려된 유효 폭을 말한다.

$$W_e = W_{MMI} + \left(\frac{\lambda_0}{\pi}\right) \left(\frac{n_c}{n_r}\right)^{2\sigma} (n_r^2 - n_c^2)^{-1/2} \quad (3)$$

여기서, TE 모드에 대해서는 $\sigma = 0$ 이고, TM 모드에 대해서는 $\sigma = 1$ 이다.

식 1을 $k_y^2 \ll k_0^2 n_r^2$ 일 때, 전파상수 β_y 에 관해서 정리하면 아래처럼 나타내진다.

$$\beta_y \approx \sqrt{k_0^2 n_r^2 - \frac{\pi^2 (v+1)^2}{W_e^2}} \approx k_0 n_r - \frac{(v+1)^2 \pi \lambda_0}{4 n_r W_e^2} \quad (4)$$

다중모드 간섭기의 가장 낮은 모드를 이용해서 beat length를 아래와 같이 정의하면,

$$L_\pi \doteq \frac{\pi}{\beta_0 - \beta_1} \approx \frac{4 n_r W_e^2}{3 \lambda_0} \quad (5)$$

위의 beat length를 이용해서 다중모드 간섭 결합기의 길이는 $L_\pi/2$ 로 간단하게 결정할 수 있다. 다중모드 간섭은 일반적 간섭과 제한적인 간섭이 있는데, 결합기의 길이를 가능한 줄여야 하기 때문에 본 연구에서는 제한적인 간섭을 적용하였다.^[7] 제한적인 간섭을 이용한 방법은 다중모드 간섭기 폭의 1/3과 2/3 지점에 입출력 도파로를 위치시키면 된다.

다중모드 간섭 결합기의 길이를 줄이는 또 다른 방법은 결합기 주변을 깊게 에칭을 함으로써 얻어 질 수 있다. 즉 짧은 결합기의 거리에서 많은 다중모드를 만들어 쉽게 간섭을 일으키게 할 수 있다.^[8] 또한 깊게 에칭을 하면 에칭 깊이에 따른 도파로의 민감도를 제거할 수 있다. 다중모드 간섭 결합기의 길이를 줄이려면 식 5에 나타나 있듯이 간섭기의 폭을 줄여야 한다. 그러나 간섭기의 폭을 줄이게 되면 간섭기의 갭도 줄어들게 되기 때문에, 입력과 출력의 광 도파로 폭을 고려하여 간섭기의 폭을 설정해야 한다. 그림 5는 다중모드 간섭기의 폭에 따른 길이와 갭을 계산한 결과이다. 실제 공정에서 컨택 aligner를 이용하게 되면 최소 해상도가 1.5 μm 가 넘어야 제작을 할 때 어려움이 없다. 따라서 간섭기의 갭이 1.552 μm 가 되는 구간에서 간섭기의 폭과 길이를 결정했다.

그림 6은 다중 모드 간섭 결합기에서 광모드의 진행을 보여준다. 왼쪽 그림에서 광 모드는 1.5 μm 의 폭을 가지는 왼쪽 도파로를 따라서 100 μm 진행한 후에 다중 모드 간섭기로 들어간다. 다중모드 간섭기로 입사된 광 모드는 도파로를 따라 진행하면서 다중 모드의 간섭을 통해 125 μm 진행한 후에 self-imaging에 의해서 간섭기 폭의 1/3과 2/3 지점에 이미지를 재생하는 것을

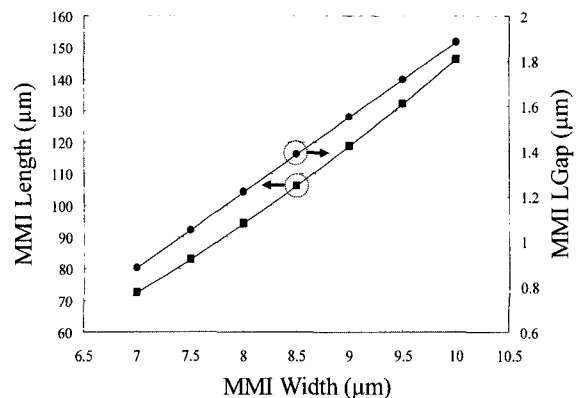


그림 5. 다중모드 간섭기의 폭에 따른 길이와 입출력 도파로 사이의 갭

Fig. 5. MMI length and gap for different MMI width.

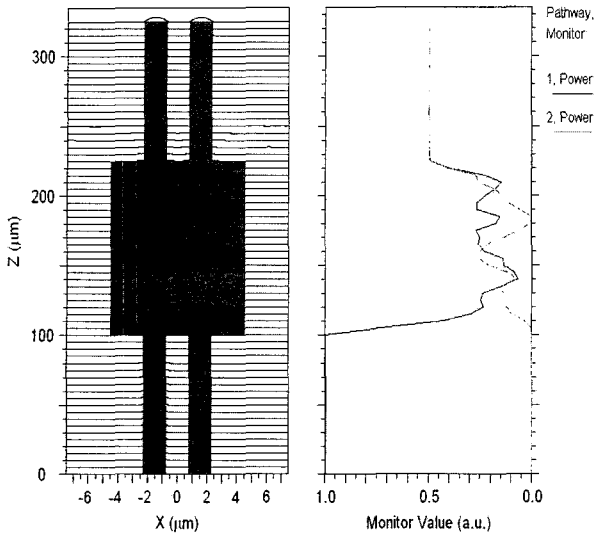


그림 6. 2x2 다중모드 간섭기의 빛의 전파
Fig. 6. Beam propagation of 2x2 multimode interference coupler.

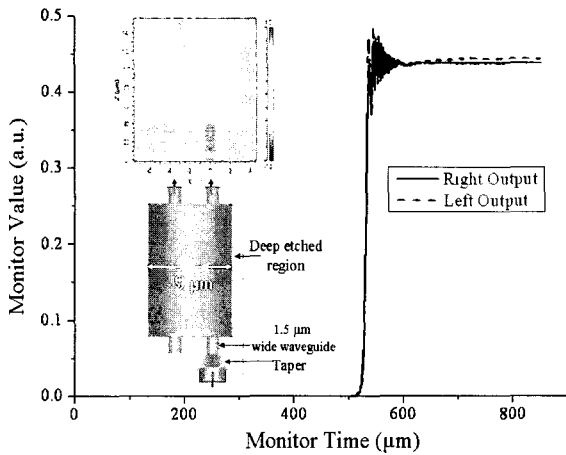


그림 7. 최적의 다중모드 간섭기 구조에서 빛의 진행
Fig. 7. Beam propagation with optimum MMI length.

보여준다. 오른쪽 그림은 광 모드의 파워를 모니터한 결과이다. 왼쪽 1.5 μm 도파로에서는 입력파워가 정규치 1이지만 다중모드 간섭기에서는 간섭으로 인해 파워가 줄었다가, self-imaging되는 부분에서는 파워가 50%로 갈라지는 것을 보여준다.

일반적으로 BPM은 굴절률의 차이가 크지 않을 경우 정확도가 높지만 굴절률 차이가 크게 되면 정확도가 떨어지므로 BPM에서 구한 초기 값을 가지고 FDTD를 이용해서 최적화된 다중모드 간섭 결합기의 구조적 최적화를 수행했다. 그림 7의 안쪽에 있는 그림은 FDTD 프로그램에 사용된 깊게 에칭이 된 다중모드 간섭 결합기의 구조를 나타낸다. 입력은 테이퍼를 이용해서 깊게 에칭이 된 영역으로 들어가고, 다중모드 간섭 결합기의

폭은 9 μm이다. 그림 7은 최적화된 다중모드 간섭 결합기의 길이를 적용해 광 모드의 진행을 본 결과이다. 이때 출력 파워는 대략 45 % 분배가 되어서, 결합기의 손실은 0.46 dB이다.

III. 실험 및 결과

그림 8은 다중모드 간섭 결합기 주변을 깊게 에칭을 해서 만든 마이크로 공진기 필터의 개략적 도면이다. 필터의 구성은 깊게 에칭이 된 다중 모드 간섭 결합기, 4개의 테이퍼, 2개의 전반사 미러, 2개의 반 링, 내부 광 증폭기로 되어 있다. 다중모드 간섭 결합기는 간섭기 주변을 깊게 에칭을 하여 간섭기의 길이와 폭을 119 μm와 9 μm로 줄였다. 다중모드 간섭 결합기 주변을 깊게 에칭을 하여 공진기 필터의 전체 길이를 줄였지만, 깊게 에칭이 된 도파로를 정상적으로 에칭이 된 일반적인 도파로가 있는 플랫폼에 연결하기 위해서 테이퍼를 이용하였다. FDTD 계산을 통해 얻어진 15 μm 길이의 테이퍼를 사용하여 깊게 에칭이 된 다중 모드 간섭 결합기와 폭이 3 μm인 정상적인 도파로를 연결하였다. 또한 다중 모드 간섭 결합기에서 도파로 폭이 1.5 μm이고 반지름이 40 μm인 링을 연결해서 전반사 미러를 통해 폭이 3 μm인 광도파로와 연결했다. 링의 반지름을 40 μm 아래로 줄이게 되면 손실이 너무 커져서 본 연구에서는 40 μm로 하였다.

이때 링 공진기 내부에서 링의 radiation 손실과 전반사 미러 손실을 극복하기 위해서 길이가 190 μm인 광 증폭기를 삽입하였다.^[9] 또한 이것은 공진기 필터의 On-Off 기능으로도 사용될 수 있다. 그리고 왼쪽 부분의 길이가 2 mm인 SOA는 소자를 측정할 때, 외부 입력을 사용하지 않고 내부에서 만든 빛을 이용해서 측정

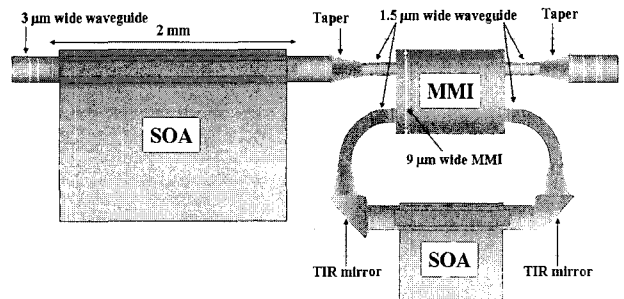


그림 8. 공진기 내부에 광증폭기가 집적되고 전반사 미러와 반링으로 구성된 링 공진기 개념도
Fig. 8. Schematic diagram of MMI coupled ring cavity resonator with TIR mirrors, half-ring and SOA.

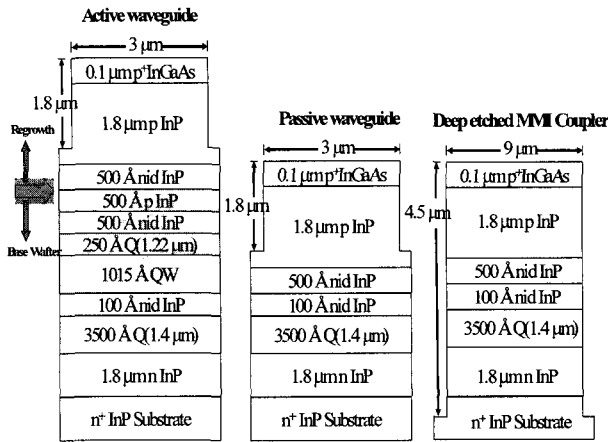


그림 9. 제작된 액티브와 패시브 도파로 구조
 Fig. 9. Cross sectional profile of the active, the passive and deep etched waveguide structure.

을 용이하게 하기 위해서 집적을 하였다.

그림 9는 반도체 광 증폭기의 액티브 구조와 광도파로와 다중 모드 간섭 결합기 부분의 패시브 구조도이다. 여기서 다중모드 간섭 결합기의 주변은 4.5 μm까지 에칭이 되고 링은 도파로의 폭이 1.5 μm이고 에칭 깊이는 4.5 μm이다. 광도파로의 가이드 부분은 InGaAsP 물질로 두께는 0.35 μm이고 1.4 μm에 해당하는 밴드갭을 가진다. 위와 아래의 클래딩 영역은 1.8 μm의 두께인 n과 p형의 InP물로 되어있다. 광 증폭기의 액티브 영역은 0.1 μm 두께의 다중양자우물 층으로 구성되어 있는데, 두께가 65 Å인 7개의 우물과 두께가 80 Å인 장벽으로 구성되어 있다.^[10] 액티브와 패시브 도파로 폭은 3 μm이고 에칭 깊이는 1.8 μm이다. 공정 순서는 한번의 웨이퍼의 재성장(regrowth)이 필요하다. 초기에 성장된 웨이퍼 구조는 그림 9의 액티브 도파로 구조에서 옆으로 되어 있는 화살표 방향까지, 즉 다중양자우물 층까지 성장이 되어 있다. 이 구조에서 광 증폭기를 만들 영역을 제외한 나머지 부분, 즉 패시브 도파로를 만들기 위해서는 액티브 층을 에칭해서 제거한다. 이렇게 제거를 한 다음에 1.8 μm의 두께의 p형 InP 층과 0.1 μm InGaAs 전극 콘택을 위한 층을 재성장 한다. 이 공정은 단지 한번의 재성장만 필요할 뿐 수직 결합기에서 요구하는 웨이퍼 본딩이 필요 없다.

그림 10은 공진기 외부에 있는 광 증폭기에 전류를 120 mA와 140 mA를 인가하고, 공진기 내부의 광 증폭기에 전류를 14 mA를 인가했을 때, 마이크로 공진기 필터의 특성을 나타낸다. 필터 특성은 1540 nm에서 160 nm까지 60 nm의 넓은 파장 대역에서 결과를 볼 수 있다. 그림 11은 공진기 외부에 있는 광 증폭기에 전류를

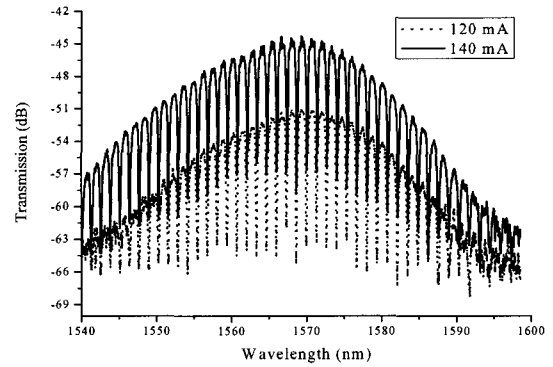


그림 10. 공진기 내부의 인가 전류가 14 mA이고, 외부의 증폭기에 인가 전류가 120 mA 와 140 mA일 때의 공진기의 특성

Fig. 10. Transmission of MMI coupled ring resonator when the SOA is biased at 120 mA and 140 mA, the device current in the resonator is biased by 14 mA.

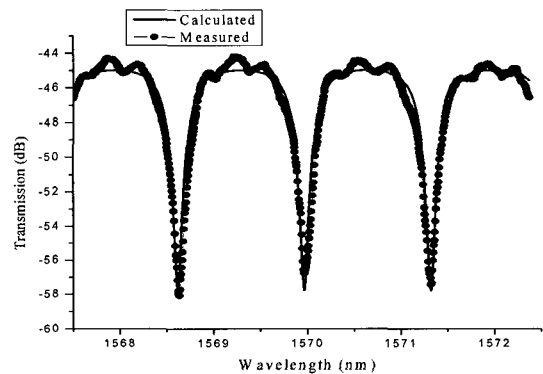


그림 11. 공진기 내부의 인가 전류가 14 mA이고, 외부의 증폭기에 인가 전류가 140 mA일 때의 공진기의 밴드스탑 특성

Fig. 11. Bandstop filter characteristics of MMI coupled ring resonator when the SOA is biased at 140 mA and the device current in the resonator is 14 mA.

140 mA를 인가하고, 공진기 내부의 광 증폭기에 전류를 14 mA를 인가했을 때, 1567.5 nm에서 1572.5 nm까지 마이크로 공진기 필터의 특성을 나타낸다. 공진기의 실험 결과는 계산한 결과와 잘 맞는 것을 볼 수 있다. 이때 FSR는 대략 1.333 nm (162 GHz)이고 소광비는 13 dB이다.

그림 12는 공진기 외부에 있는 광 증폭기에 전류를 140 mA로 고정을 시키고, 공진기 내부의 광 증폭기의 전류를 0 mA에서 6 mA까지 변화를 주면서 인가를 하였다. 내부 광 증폭기에 전류가 인가되지 않았을 때는 필터 특성이 보이지 않았다. 이것은 외부 광 증폭기에

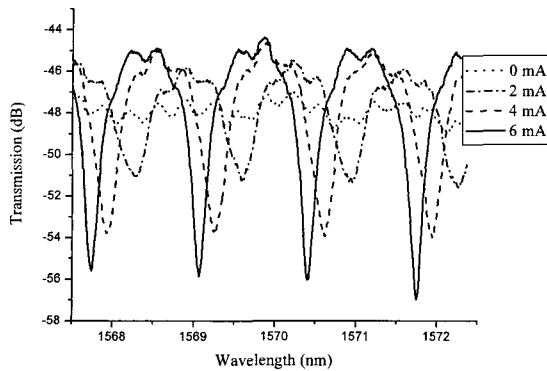


그림 12. 외부에 있는 증폭기의 인가 전류를 140 mA로 고정 시키고, 내부 인가 전류를 0에서 6 mA로 변화 시켰을 때, 공진 파장의 변화

Fig. 12. Variation of the resonator transmission when the SOA is biased at 140 mA and the device current in the resonator is changed from 0 mA to 6 mA.

서 발생된 광원이 도파로를 따라 진행하다가 공진기 부분에 있는 다중모드 간섭 결합기를 통해서 결합하게 되는데, 결합된 광파는 첫 번째로 공진기 내부에 있는 전반사 미러에 의해서 손실을 겪고, 두 번째로 광 증폭기가 액티브 물질이므로 도파로를 따라 진행하면서 전부 흡수되기 때문에 내부 공진기에 전류가 인가되지 않으면 필터 특성이 전부 손실되어 나타나지 않게 된다. 따라서 공진기 내부의 광 증폭기에 전류를 증가 시키면 증폭기에서 전반사 미러와 도파로에서 발생하는 손실을 극복할 만큼의 이득이 형성되어 도파로를 진행하는 광파의 손실을 줄이게 된다. 광파가 공진기 안에서 손실을 극복하고 필터의 특성을 나타내기 시작할 때 계속해서 전류를 증가 시키면 필터 특성의 소광비가 증가한다. 또한 공진 파장은 전류가 증가함에 따라서 작은 파장으로 이동하게 되는데, 이것은 공진기 내부에 있는 광 증폭기에 전류를 인가하게 되면 굴절률이 작아지기 때문이다. 플라즈마 효과 때문에 전류인가로 인한 캐리어들의 주입은 굴절률의 감소를 가져온다.

그림 13은 공진기의 임계 결합 계수와 이때의 공진기 내의 임계손실이 얼마인지 알기 위해서, 그림 12에서 얻어진 측정값에서 두 개의 이웃하는 공진 파장을 곡선 피벗에 의해 구한 각각의 값과 이것들의 평균값이다. 두 개의 서로 다른 공진 파장에서 곡선 피벗에 의해서 얻어진 결과는 서로 다른 결과를 나타낸다. 이것은 실제 소자를 측정할 때 측정 장비의 한계로 인해서 공진 파장의 최소 점을 정확히 측정하기가 어렵기 때문이다. 본 실험에 사용된 광 증폭기의 디자인에서 광 도파로의

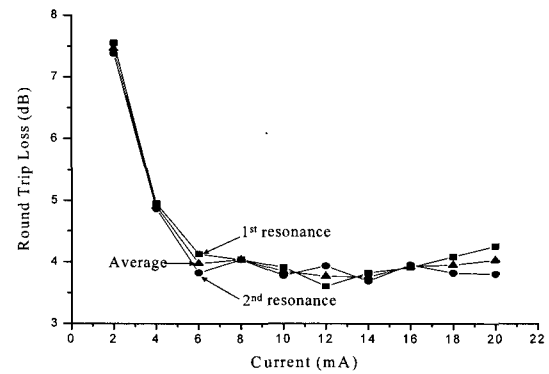


그림 13. 실험에서 얻어진 결과를 곡선 피벗을 이용해서 내부 공진기의 인가 전류의 변화에 따른 공진기 내부 손실의 변화

Fig. 13. Variation of the round trip loss of the resonator for different SOA currents within the resonator based on curve fitting.

손실을 없애기 위한 바이어스 전류는 2 mA이다.^[10] 이때의 공진기 내부 손실은 7.5 dB이다. 내부 공진기의 광 증폭기의 바이어스 전류를 증가시키면 광 증폭기의 이득이 커지면서 내부 손실은 줄어들게 되지만 곧 광 증폭기의 이득은 포화 상태가 되는데, 이때 내부 손실은 대략 4 dB 정도로 변하지 않게 된다. 즉 광 증폭기의 포화 이득은 대략 3.5 dB이다. 또한 곡선 피벗에 의해서 파워 결합력은 대략 42 %을 얻을 수 있었고, 이때 공진기 내부 손실은 대략 2.4 dB이다.

IV. 결 론

본 연구에서는 WDM 시스템의 집적화를 위해서 InP 기반의 신개념의 마이크로 링 공진기 필터를 제안하고, 제작을 통해서 그 특성을 측정 분석하였다. 전반사 미러가 삽입된 구조는 자동 정렬 공정을 통해서 구현하였고, 측정된 전반사 미러의 손실은 한 개의 미러당 0.71 dB를 얻을 수 있었다. 마이크로 링 공진기의 결합기로는 다중모드 간섭기로 간섭기의 주변을 깊게 에칭을 하여 간섭기의 길이와 폭을 119 μm 와 9 μm 로 하였다. 링 공진기 내부의 광도파로와 전반사 미러에서의 손실을 보상하기 위해서 링 공진기 내부에 길이가 190 μm 인 반도체 광 증폭기를 집적하였다. 이때 얻어진 FSR는 대략 1.333 nm (162 GHz)이고 소광비는 13 dB이다. 제작된 마이크로 링 공진기 필터는 파장 변환기나 파장 가변 레이저등과 쉽게 집적이 가능하다.

참 고 문 헌

- [1] Little B.E., Chu S.T., Pan W., Ripin D., Kaneko T., Kokubun Y., Ippen E., "Vertically coupled glass microring resonator channel dropping filters," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, pp. 215-217, Feb. 1999.
- [2] Chu S.T., Little B.E., Pan W., Kaneko T., Sato S., Kokubun Y., "An eight-channel add-drop filter using vertically coupled microring resonators over a cross grid," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, pp. 691-693, June. 1999.
- [3] K. Sasayama, F. Fruh, T. Kominato, and K. Habara, "Photonic frequency-division-multiplexing highway switch using integrated-optic multiple ring resonators," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E78-B, pp. 674-678, May. 1995.
- [4] R. Grover, T. A. Ibrahim, T. N. Ding, Y. Leng, L. C. Kuo, S. Kanakaraju, K. Amarnath, L. C. Calhoun, P. T. Ho, "Laterally coupled InP-based single-mode microracetrack notch filter," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol.15, no.8, pp.1082-4, Aug. 2003.
- [5] H. Appleman, J. Levy, M. Pion, D. Krebs, C. Harding, and M. Zediker, "Self-aligned, chemically assisted ion-beam etched GaAs/AlGaAs turning mirrors for photonics applications," *J. Lightwave Technol.*, vol. 8, pp. 39-41, 1990.
- [6] O. Bryngdahl, "Image formation using self-imaging techniques," *J. Opt. Soc. Amer.*, vol. 63, no. 4, pp. 416-418, 1973.
- [7] Lucas B. Soldano and Erik C. M. Pennings, "Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: Principles and Applications," *J. Lightwave Technol.*, vol.13, pp. 615-627, April. 1995.
- [8] L. H. Spiekman, Y. S. Oei, E. G. Metaal, F. H. Groen, I. Moerman, and M. K. Smit, "Extremely Small Multimode Interference Couplers and Ultrashort Bend on InP by Deep Etching," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol.6, pp. 1008-1010, Aug. 1994.
- [9] D. G. Rabus, M. Hamacher, U. Troppenz, and H. Heidrich, "High-Q channel-dropping filters using ring resonators with integrated SOAs," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, pp.1442-1444, 2002.
- [10] B. Mason, J. Barton, G. A. Fish, L. A. Coldren and S. P. DenBaars, "Design of Sampled Grating DBR Lasers with Integrated Semiconductor Optical Amplifiers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol.12, no. 7, pp. 762- 764, July 2000.

저 자 소 개



김 두 근(정회원)

1998년 중앙대학교 전자공학과
(공학사).

2000년 중앙대학교 영상공학부
(공학석사).

2003년 중앙대학교 전자전기
공학부 (공학박사).

2003년~2005년 산타바바라 캘리포니아 주립대
(UCSB), 연구원.

2005년~현재 중앙대학교 전자공학과 연구교수
<주관심분야: 광스위칭 시스템 및 소자, 바이오
센서>



최 영 완(정회원)

1985년 서강대학교 전자공학과
(공학사).

1987년 버팔로 뉴욕주립대(SUNY
at Buffalo), 전기 및 컴퓨
터공학과(공학석사).

1992년 버팔로 뉴욕주립대(SUNY
at Buffalo), 전기 및 컴퓨
터공학과(공학박사).

1992년~1995년 한국전자통신연구원(ETRI),
선임연구원.

1995년~현재 중앙대학교 전자공학과 교수.

<주관심분야: Microwave-Photonics, Optical
interconnection, 광스위칭 시스템 및 소자>