

다중모드 결합기의 입출력 광도파로 사이에 광결합이 없는 삼각형 링 공진기

논 문
59P-1-21

Triangular Ring Resonator Without Direct Coupling Between Two Access Waveguides of Multimode Interference Coupler

김 두 근[†] · 김 효 진* · 김 선 훈** · 기 현 철*** · 김 회 중[§] · 오 금 윤^{§§} · 최 영 완^{§§§}

(Doo-Gun Kim · Hyo-Jin Kim · Seon-Hoon Kim · Hyun-Chul Ki · Hwe-Jong Kim · Geum-Yoon Oh · Young-Wan Choi)

Abstract - We have investigated the properties of the novel triangular ring resonator with the total internal reflection mirrors and the semiconductor optical amplifier for photonic integrated circuits (PIC). A novel triangular resonators containing active and passive sections are fabricated and characterized with various multimode interference (MMI) lengths. The optimum MMI length and width turn out to be 108 and 9 μm , respectively. A free spectral range of approximately 228 GHz is observed near 1558 nm along with an on-off ratio of 9 dB. The proposed triangular resonator has a good advantage to remove the direct coupling between the two access waveguides of the MMI coupler. Hence, such resonators can be directly integrated with other devices making compact and highly functional PIC possible.

Key Words : Triangular Ring Resonator, Multimode Interference Coupler, Total Internal Reflection Mirror

1. 서 론

링 공진기는 광집적화 시스템에서 광변조기, 광스위치, 광필터, 광로직 및 메모리와 같은 다양한 기능을 제공할 수 있는 소자이다. 이러한 링 공진기는 높은 파장 선택성으로 인해서 파장 분할 다중화 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) 광통신에서 중요한 광소자로 인식되고 있고, 또한 링 공진기는 다른 광소자와 비교해서 소자 크기가 매우 작고, 많은 수의 공진기를 같은 칩(On-chip)에 집적할 수 있다. 이러한 이유로 아직도 세계 많은 연구진에 의해서 깊이 있게 연구되어 지고 있다.[1-3]

링 공진기는 파이버나 폴리머와 같은 물질을 이용하여 지금까지 많은 방법이 시도되었지만, 이러한 광시스템 집적화를 위해서는 InP 기반의 도파형 구조가 필수적이라 생각된다. InP 기반의 광도파로를 이용해서 반경이 작은 링을 만들기 위해서는 광도파로 주변을 깊게 에칭을 해야 곡면 손실을 줄일 수 있는데, 이렇게 광도파로 주변을 깊게 에칭을 하면 광도파로의 측면 광가둠 효과를 높일 수 있지만, 측면 거칠기는 광 전파 손실을 증가시키게 된다. 또한 링 공진기를 형성하고 있는 도파로 자체가 진성 물질로 되어 있는 경우, 진성 물질을 통한 에칭은 과도표면 재결합(excessive

surface recombination) 때문에 문제가 야기된다. 더욱이 이러한 링 공진기는 곡면 손실의 증가로 링의 직경을 줄이면서 콤팩트하게 만들기 어렵게 된다. 이런 문제는 링 공진기를 전반사 (TIR: Total Internal Reflection) 미러로 구현한다면 해결 될 수가 있다. 즉, 링 공진기를 일반적인 광도파로를 이용하여 구성하고, 링의 코너부분에 전반사 미러를 삽입하여 아주 콤팩트한 마이크로 공진기를 구현할 수 있다.

그리고 빛이 광도파로를 따라 진행할 때 링 공진기로 결합되는 결합기를 방향성 결합기인 측면 결합으로 할 경우, 측면 결합의 간격이 서브 마이크론이 요구된다.[4] 이러한 결합기의 서브 마이크론 간격은 공정의 재연성을 어렵게 만든다. 그러나 이런 짧은 간격에서의 강한 결합기는 수직 결합기를 사용하여 만들 수 있지만, 수직 결합은 일반적으로 웨이퍼 본딩(wafer bonding) [5]이나 기판 제거(substrate removal) [6]에 의해서 만들어진다. 따라서 이러한 공진기들은 일반적인 레이저 공정순서에 맞지 않아서 같은 플랫폼에 집적을 어렵게 만든다. 따라서 이러한 공진기들을 같은 플랫폼에 쉽게 집적할 수 있는 공정을 개발해야 한다.

본 연구에서는 위에서 언급한 문제를 해결하기 위해서, 링 공진기는 전반사 미러를 이용하여 링의 전체 길이를 줄였고, 광도파로에 광 증폭기를 삽입하여 광도파로와 미러에서 발생하는 손실을 극복하였다. 링 공진기의 결합기로는 다중모드 간섭기를 이용하여 빛이 광도파로를 따라 진행할 때 링으로 결합되는 파워를 높였다. 위의 공정은 일반적인 레이저 다이오드의 공정과 같아서 광원이나 광변조기 또는 다른 패시브 광소자와 쉽게 집적을 할 수 있는 장점을 가지고 있다.

2. 링 공진기 구성

2.1 전반사 미러와 테이퍼

소 소형 삼각형 링 공진기는 광도파로에서 광경로를 변경

[†] 교신저자, 정회원 : 한국광기술원 광소자팀 선임연구원 · 공박
E-mail : emblemdo@kopti.re.kr

* 비 회 원 : 한국광기술원 책임연구원 · 이박

** 비 회 원 : 한국광기술원 광소자팀 선임연구원

*** 정 회 원 : 한국광기술원 선임연구원 · 공박

[§] 비 회 원 : 한국광기술원 책임연구원 · 이박

^{§§} 비 회 원 : 중앙대 공대 전자전기공학부 박사과정

^{§§§} 정 회 원 : 중앙대 공대 전자전기공학부 교수 · 공박

접수일자 : 2010년 1월 20일

최종완료 : 2010년 1월 25일

할 위치에 전반사 미러를 위치시켜서 구성된다. 그러나 InGaAsP 물질로 구성된 광도파로에서 손실이 적은 전반사 미러를 구현하기 위해서는 제작 공정이 자동정렬 (self-aligned) 되어야 한다. 즉, 입출력 광도파로와 미러 계면과의 오프셋(offset)을 정확히 하기 위해서, 첫 번째 마스크 공정에서 입출력 광도파로와 미러 블록을 동시에 패턴을 해야 한다. 그리고 첫 번째 식각 공정에서 광도파로가 단일 모드가 나올 정도까지 식각을 하고, 두 번째 마스크 공정에서 미러 부분만 오픈을 한다. 마지막으로 오픈된 미러 부분을 깊게 식각을 해서 전반사 미러를 완성한다. 이렇게 하면 광도파로와 미러의 정렬오차(misalignment)에 따른 부가적인 손실을 제거할 수 있다.

또한 최소의 손실을 갖는 전반사 미러를 제작하기 위해서는 전반사 미러의 구조적인 최적화가 필요하다. 반도체에서 전반사 미러는 광도파로를 깊게 에칭을 해서 만들어지는데, 이때 반도체와 공기면의 임계각은 17° 이다. 일반적으로 평면파가 전반사 미러를 통해 반사할 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 위치를 잡아야 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 출력광도파로로 전반사 시키는 것은 원칙적으로 불가능 하다는 것을 말해준

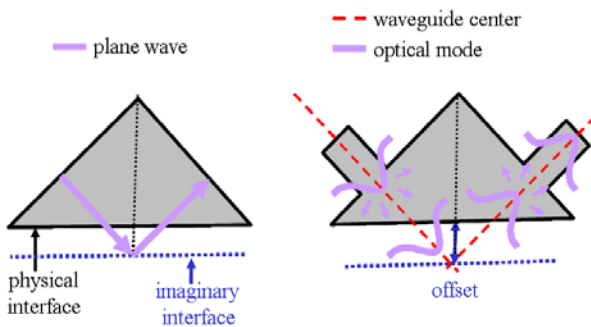


그림 1 광도파로 전반사 미러 개략도.
Fig. 1 TIR mirror using optical waveguide.

다. 따라서 언제나 기본적인 광 손실은 존재한다. 그러나 광 모드가 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 미러 계면의 위치에 따른 광 손실을 유한 차분 시간 영역 (FDTD: Finite Difference Time Domain) 방법을 이용해서 계산한 결과이다. 계산에 이용된 구조는 입사각이 30도이고, 미러 계면의 오프셋 방향은 바깥쪽이 플러스이고 안쪽이 마이너스를 의미한다. 그림 2의 내부에 삽입된 그림은 광모드가 입력되어 전반사 미러를 경험하고 출력되는 것을 나타낸다. 미러 계면의 최적의 오프셋은 미러 계면이 안쪽으로 $0.4 \mu\text{m}$ 들어갔을 때 최소의 미러 손실을 갖는다. 이때의 미러 손실은 대략 0.66 dB/mirror 이다. 입사각이 45도일 때 오프셋은 미러 계면이 안쪽으로 $0.1 \mu\text{m}$ 들어갔을 때 최소의 미러 손실을 유지했는데 [7], 본 연구에서 입사각이 작아졌을 때 오프셋이 더 커진다는 것을 확인할 수 있었다.

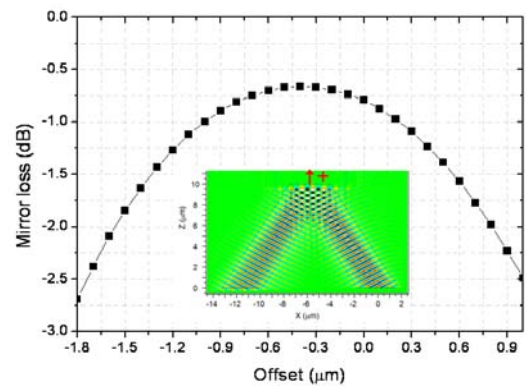


그림 2 도파로 사이에 있는 미러의 손실.
Fig. 2 Mirror loss for corner reflector.

본 연구에서는 다중모드 간섭 결합기 주변을 깊게 에칭을 하여 공진기 필터의 전체 길이를 줄였지만, 깊게 에칭이 된 광도파로를 정상적으로 에칭이 된 일반적인 광도파로가 있는 플랫폼에 연결하기 위해서 테이퍼를 이용하였다. FDTD 계산을 통해서 0.1 dB 이하의 전파 손실을 유지할 수 있는 최소의 테이퍼 길이는 $15 \mu\text{m}$ 임을 그림 3을 통해서 확인하

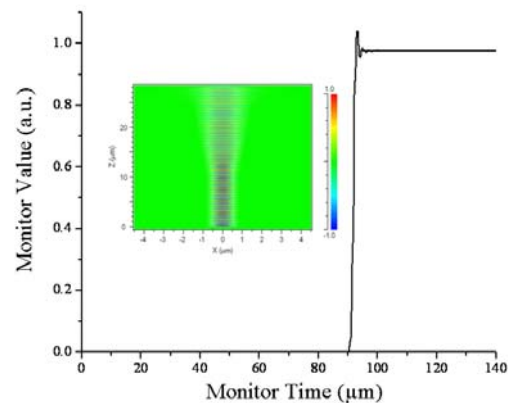


그림 3 테이퍼 구조에서 빛의 진행.
Fig. 3 Beam propagation in taper structure.

었다. 이때 테이퍼의 시작 부분의 폭은 $1.5 \mu\text{m}$ 이고 끝 부분은 $3 \mu\text{m}$ 이다. 따라서 $15 \mu\text{m}$ 길이의 테이퍼를 사용하여 깊게 에칭이 된 다중 모드 간섭 결합기와 폭이 $3 \mu\text{m}$ 인 정상적인 광도파로를 연결하였다.

2.2 다중모드 간섭 결합기

다중모드 간섭을 이용한 광 결합기는 광집적 회로에서 광을 분기하고 결합시키는데 중요한 역할을 하는 광소자이다. 다중모드 간섭 결합기의 기본 원리는 이미지 재생 (self-imaging)이다. 즉 다중모드 간섭 결합기로 입사된 광모드가 도파로를 따라 진행하면서 주기적인 간격으로 싱글이나 멀티 이미지를 재생하는 것을 말한다.[8] 본 연구에서 마이크로 링 공진기 필터에 적용하기 위해서 50%가 결합되는 2×2 다중모드 간섭 결합기를 선택하였다. 그러나 실제적인 결합률은 전파 손실, 광모드 불일치 등으로 인해서 50%가 되지 않는다. 다중모드 간섭은 일반적 간섭과 제한적인 간섭이 있는데, 결합기의 길이를 가능한 줄여야 하기 때문에 본 연구에서는 제한적인 간섭을 적용하였다.[9] 제한적인 간섭을 이용한 방법은 그림 4에서처럼 다중모드 간섭기 폭의 $1/3$ 과 $2/3$ 지점에 입출력 도파로를 위치시키면 된다.

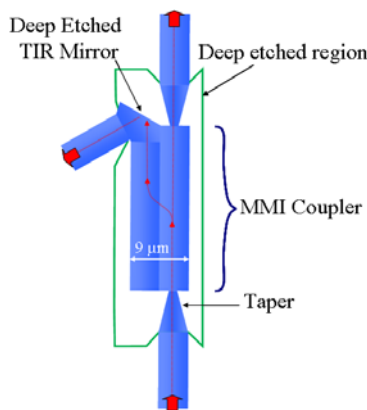


그림 4 2×2 다중모드 간섭 결합기.
Fig. 4 2×2 MMI coupler.

다중모드 간섭 결합기의 길이를 줄이는 또 다른 방법은 결합기 주변을 깊게 에칭을 함으로써 얻어 질 수 있다. 즉 짧은 결합기의 거리에서도 많은 다중모드를 만들어 쉽게 간섭을 일으키게 할 수 있다.[10] 또한 깊게 에칭을 하면 에칭 깊이에 따른 도파로의 민감도를 제거할 수 있다. 다중모드 간섭 결합기의 길이를 줄이려면 간섭기의 폭을 줄여야 한다. 그러나 간섭기의 폭을 줄이게 되면 간섭기의 입력과 출력 광도파도들 사이의 겹도 줄어들게 되기 때문에, 입력과 출력의 광 도파로 폭을 고려하여 간섭기의 폭을 설정해야 한다. 실제 공정에서 접촉식 노광기(aligner)를 이용하게 되면 최소 $1 \mu\text{m}$ 이하의 패턴을 형성하기가 어렵기 때문에 다중모드 간섭 결합기의 길이를 줄이는 데는 한계가 있다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해서 다중모드 간섭 결합기의 입출력 도파로에서 링 공진기로 결합되는 부분을 전반사 미러를 위치시켰다. 그림 4에 제시된 다중모드 간섭 결합기 구조는 입출력 도파로들 사이의 민감도를 줄일 수 있어서 결합기의 크기를 줄일 수 있는 가능성을 보여준다.

그림 5는 다중모드 간섭 결합기의 폭이 $9 \mu\text{m}$ 일 때, 결합기의 길이를 $104 \mu\text{m}$ 에서 $116 \mu\text{m}$ 까지 가변 시켰을 때의 광출력을 FDTD 프로그램을 이용해서 계산한 결과이다. 다중모드 간섭 결합기의 길이가 $108 \mu\text{m}$ 일 때 왼쪽 도파로로 출력되는 파워와 전반사 미러를 통해서 링 공진기로 결합되는 파워의 비율이 같아지게 되는 것을 알 수 있다. 이때의 출력 파워는 대략 40%로 분배가 된다.

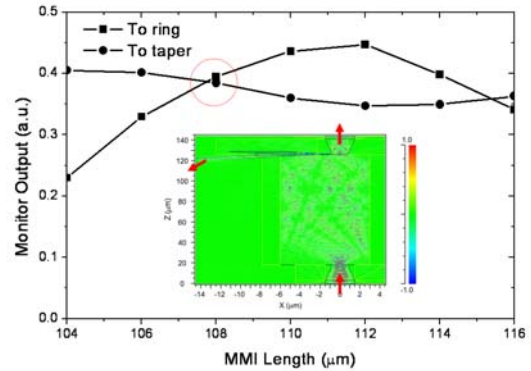


그림 5 다중모드 간섭 결합기의 길이에 따른 출력 특성.
Fig. 5 FDTD simulation results for different MMI lengths.

3. 결과 및 고찰

그림 6은 다중모드 간섭 결합기 주변을 깊게 에칭을 해서 만든 삼각형 링 공진기의 개략적 도면이다. 공진기의 구성은 깊게 에칭이 된 다중 모드 간섭 결합기, 2개의 테이퍼, 3개의 전반사 미러 및 내부 광 증폭기로 되어 있다. 다중모드 간섭 결합기 주변을 깊게 에칭을 하여 공진기 필터의 전체 길이를 줄였지만, 이때 링 공진기 내부에서 링의 방사 (radiation) 손실과 전반사 미러 손실을 극복하기 위해서 길이가 $60 \mu\text{m}$ 인 광 증폭기를 삽입하였다.[11] 또한 이것은 공진기 필터의 On-Off 기능으로도 사용될 수 있다.

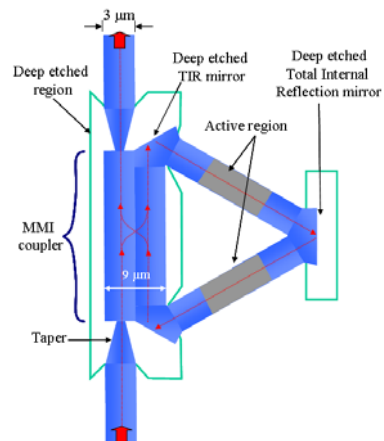


그림 6 삼각형 링 공진기 개념도.
Fig. 6 Schematic diagram of triangular ring resonator.

그림 7은 반도체 광 증폭기의 액티브 구조와 광도파로와 다중 모드 간섭 결합기 부분의 패시브 구조도이다. 여기서

다중모드 간섭 결합기의 주변은 $4.5 \mu\text{m}$ 까지 에칭이 되고 링은 도파로의 폭이 $1.5 \mu\text{m}$ 이고 에칭 깊이는 $4.5 \mu\text{m}$ 이다. 광도파로의 가이드 부분은 InGaAsP 물질로 두께는 $0.35 \mu\text{m}$ 이고 $1.4 \mu\text{m}$ 에 해당하는 밴드갭을 가진다. 위와 아래의 클래딩 영역은 $1.8 \mu\text{m}$ 의 두께인 n과 p형의 InP물로 되어있다. 광 증폭기의 액티브 영역은 $0.146 \mu\text{m}$ 두께의 다중양자우물층으로 구성되어 있는데, 두께가 70 \AA 인 8개의 우물과 두께가 100 \AA 인 9개의 장벽으로 구성되어 되어 있다. 액티브와 패시브 도파로 폭은 $3 \mu\text{m}$ 이고 에칭 깊이는 $1.8 \mu\text{m}$ 이다.

공정 순서는 한번의 웨이퍼의 재성장(regrowth)이 필요하다. 초기에 성장된 웨이퍼 구조는 그림 7의 액티브 도파로 구조에서 옆으로 되어 있는 화살표 방향까지, 즉 다중양자 우물층까지 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 $1.8 \mu\text{m}$ 의 두께의 p형 InP 층과 $0.1 \mu\text{m}$ InGaAs 전극 콘택을 위한 층을 재성장 한다. 그림 8은 재성장을 한 후에 삼각형 공진기를 만들기 위해서 박막으로 마스크 패턴을 형성한 것을 보여준다. 이 공정은 단지 한번의 재성장만 필요할 뿐 수직 결합기에서 요구하는 웨이퍼 본딩이 필요 없다.

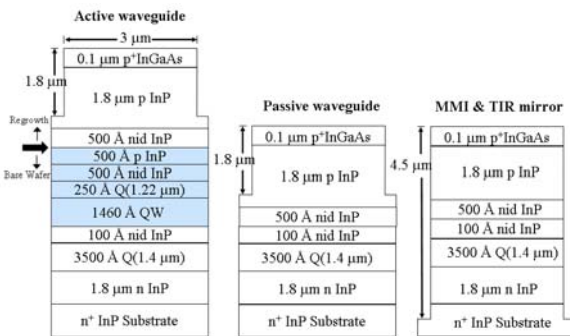


그림 7 제작된 액티브와 패시브 도파로 구조.
Fig. 7 Cross sectional profile of the active, the passive and deep etched waveguide structure.

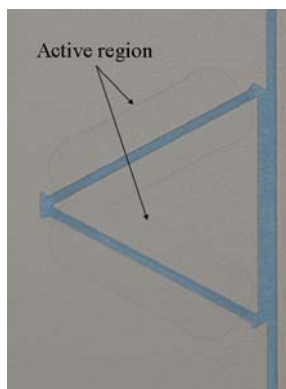


그림 8 재성장 후에 형성된 삼각형 공진기.
Fig. 8 Triangular resonator after regrowth.

그림 9는 실험을 통해서 제작된 삼각형 링 공진기의 사진이다. 삼각형 공진기 내부에 2개의 이득 영역이 있고, 다중모드 간섭 결합기 주변으로 깊게 식각이 된 것을 확인할 수 있다.

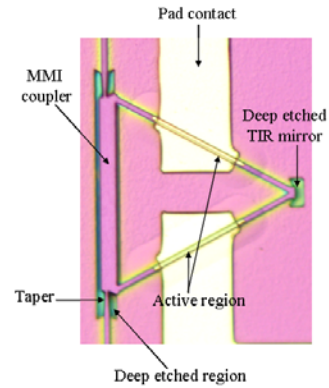


그림 9 제작된 삼각형 공진기 사진.
Fig. 9 Fabricated picture of triangular resonator.

그림 10은 삼각형 공진기 내부의 광 증폭기에 0 mA와 10 mA의 전류를 인가했을 때의 공진 특성을 나타낸다. 내부 광 증폭기에 전류가 인가되지 않았을 때는 공진 특성이 좋지 않다. 이것은 외부 광 증폭기에서 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 공진기 내부의 광 증폭기가 액티브 물질로 구성되어 있어 도파로를 따라 진행하면서 흡수되기 때문에 내부 공진기에 전류가 인가되지 않으면 공진 특성이 잘 나타나지 않게 된다. 장파장 쪽에서는 흡수되는 양이 작아서 상대적으로 광파 손실이 작게 되어 공진 특성이 보여진다. 따라서 공진기 내부의 광 증폭기에 전류를 증가시키면 증폭기에서 전반사 미러와 도파로에서 발생하는 손실을 극복할 만큼의 이득이 형성되어 광파의 손실을 줄이게 된다. 광파가 공진기 안에서 손실을 극복하고 공진 특성을 나타내기 시작할 때 계속해서 전류를 증가시키면 공진 특성의 소광비가 증가한다.

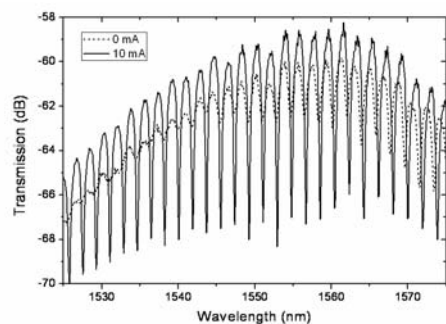


그림 10 인가 전류가 0과 10 mA일 때의 공진 특성.
Fig. 10 Transmissions of triangular resonator.

그림 11은 다중모드 간섭기의 결합 길이가 $106 \mu\text{m}$ 에서 $116 \mu\text{m}$ 로 변할 때, 삼각형 링 공진기의 소광비와 FSR를 보여준다. 이때 삼각형 공진기 내부의 광 증폭기에 10 mA의 전류를 인가하였다. 다중모드 간섭기 길이가 $108 \mu\text{m}$ 일 때 최적의 필터 특성을 얻을 수 있었고, 이때 FSR는 대략 228 GHz이고 소광비는 9 dB이다.

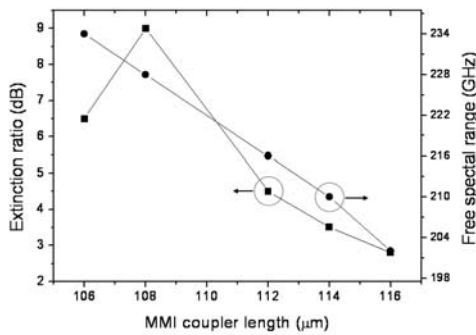


그림 11 다중모드 간섭 결합기 길이에 따른 삼각형 공진기의 소광비.

Fig. 11 Extinction ratio of triangular resonators with different lengths of an MMI coupler.

4. 결 론

본 연구에서는 광통신 시스템의 집적화를 위해서 InP 기판의 신개념의 삼각형 링 공진기를 제안하고, 제작을 통해서 그 특성을 측정 분석하였다. 삼각형 링 공진기의 결합기로는 다중모드 간섭기로 간섭기의 주변을 깊게 에칭을 하여 간섭기의 길이와 폭을 108 μm와 9 μm로 하였다. 삼각형 링 공진기 내부의 광도파로와 전반사 미러에서의 손실을 보상하기 위해서 링 공진기 내부에 길이가 60 μm인 반도체 광증폭기를 집적하였다. 이때 얻어진 FSR는 대략 228 GHz이고 소광비는 9 dB이다.

본 연구에서 제안된 삼각형 공진기는 다중모드 결합기의 입력과 출력 광도파로들 사이에서 발생할 수 있는 광결합으로 인한 손실을 없앨 수 있는 장점을 가지고 있다. 따라서 이러한 공진기는 대용량 광전송 시스템 집적화에 다양한 기능을 제공할 수 있을 것으로 본다.

감사의 글

본 논문은 2009년 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2009-0073329).

참 고 문 헌

[1] B.E. Little, S.T. Chu, W. Pan, D. Ripin, T. Kaneko, Y. Kokubun, and E. Ippen, "Vertically coupled glass microring resonator channel dropping filters," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, pp. 215-217, Feb. 1999

[2] S.T. Chu, B.E. Little, W. Pan, T. Kaneko, S. Sato, and Y. Kokubun, "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] D.G. Kim, Y.W. Choi, "Wide tuning characteristics of double-ring coupled lasers", *Optics Communications*, vol. 282, pp. 2516-2523, July. 2009

[4] R. Grover, T.A. Ibrahim, T.N. Ding, Y. Leng, L.C. Kuo, S. Kanakaraju, K. Amarnath, L.C. Calhoun, and 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] S.J. Choi, K. Djordjev, P.D. Dapkus, W. Lin, G. Griffel, R. Menna, and J. Connolly, "Microring resonators vertically coupled to buried heterostructure bus waveguides," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol.16, no.3, pp.828-30. March 2004.

[6] C. Ozturk, Y.J. Chiu, and N. Dagli, "Polymer/compound semiconductor hybrid micro resonators with very wide free spectral range", *IEEE/LEOS 2002 Annual Meeting*, Paper ThN-2, Glasgow, UK, Nov. 11- 14, 2002.

[7] D.G. Kim, C. Ozturk, J.H. Shin, J.C. Yi, and N. Dagli, "Self-aligned total internal reflection mirrors with very low loss," *Integrated Photonics Research Conference Proceedings*, IPR2004, IThG5, San Francisco, CA, Jun. 30-Jul. 2 2004.

[8] O. Bryngdahl, "Image formation using self-imaging techniques," *J. Opt. Soc. Amer.*, vol. 63, no. 4, pp. 416-418, 1973

[9] L.B. Soldano and E.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

[10] 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 Eetching," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 6, pp. 1008-1010, Aug. 1994

[11] D.G. Kim, Y.W. Choi, J.C. Yi, and N. Dagli, "Compact Rectangular Ring Resonator with Optimum Multimode Interference", *Jpn. J. Appl. Phys*, vol. 46, no. 42, pp. L1019-L1021, Oct. 2007

저 자 소 개



김 두 근 (金斗根)

1965년 7월 13일생. 1998년 중앙대학교 전자공학과 졸업 (학사). 2000년 동 대학교 영상공학부 졸업 (석사). 2003년 동 대학교 전자전기공학부 졸업 (공학). 2003년~2005년 산타바바라 캘리포니아 주립대 객원연구원. 2006년~2008년 중앙대학교 전임연구원, 2008년~현재 한국광기술원 광소자팀 선임연구원

Tel : 062-605-9214

Fax : 062-605-9229

E-mail : emblemdo@kopti.re.kr



김 효 진 (金孝鎭)

1968년 6월 4일생. 1992년 광운대학교 물리학과 졸업 (학사). 1994년 동 대학교 전자물리학과 졸업 (석사). 2001년 동 대학교 전자물리학과 졸업 (이박). 2001년~ 2003년 일본 북해도대학교 집적 양자전자 연구센터 연구원. 2003년~ 현재 한국광기술원 광소자팀 책임연구원
Tel : 062-605-9211
Fax : 062-605-9229
E-mail : hjk@kopti.re.kr



김 회 종 (金會宗)

1963년 01월 18일생. 1988년 서강대학교 물리학과 (학사). 1991년 동 대학원 물리학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 물리학과 졸업(이박). 1992년~2002년 한국과학기술연구원 선임연구원. 2000년~2002년 미국 UCSB 전자공학과 객원연구원 2002년~현재 한국광기술원 책임연구원
Tel : 062-605-9210
Fax : 062-605-9229
E-mail : hjkim@kopti.re.kr



김 선 훈 (金宣訓)

1972년 1월 31일생. 1995년 전남대학교 무기재료공학과 졸업 (학사). 2001년 동 대학원 금속공학과 졸업 (석사). 2007년 동 대학원 광공학과 박사과정수료. 2002년~현재 한국광기술원 광소자팀 선임연구원
Tel : 062-605-9212
Fax : 062-605-9229
E-mail : shkim@kopti.re.kr



오 금 윤 (吳錦潤)

1981년 2월 13일생. 2007년 중앙대학교 전자전기공학부 졸업 (학사). 2007년 동 대학교 대학원 전자전기공학부 (석·박사 통합과정 재학중).
Tel : 02-820-5326
Fax : 02-822-5326
E-mail : geumyoon_oh@wm.cau.ac.kr



기 현 철 (奇 玆 徹)

1975년 3월 11일생. 1998년 전남대학교 전기공학과 졸업 (학사). 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업 (석사). 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업 (공박). 1998년~2001년 전남대학교 공업기술연구소 연구원. 2002년~2004년 한국광기술원 전문연구요원, 2004년~현재 한국광기술원 광소자팀 선임연구원
Tel : 062-605-9213
Fax : 062-605-9229
E-mail : kihc@kopti.re.kr



최 영 완 (崔永完)

1962년 5월 30일생. 1985년 서강대학교 전자공학과 졸업 (학사). 1987년 버팔로 뉴욕주립대 전기 및 컴퓨터공학과 졸업 (석사). 1992년 동 대학원 전기 및 컴퓨터공학과 졸업 (공박). 1992년~1995년 한국 전자통신연구원 선임연구원. 1995년~현재 중앙대학교 전자전기공학부 교수
Tel : 02-820-5326
Fax : 02-822-5326
E-mail : ychoi@cau.ac.kr