

논문 2008-45SD-8-3

전반사 미러와 방향성 결합기를 이용한 직사각형 링 레이저

(Rectangular ring laser based on total internal reflection mirror and directional coupler)

김 두 근*, 최 영 완*

(Doo Gun Kim and Young-Wan Choi)

요 약

본 연구에서는 InP 물질의 능동과 수동 광도파로를 포함하는 신개념의 직사각형 링 레이저를 제작하여 그 특성을 측정하고 분석하였다. 직사각형 링 레이저의 구성은 작은 광 손실을 갖는 네 개의 전반사 미러와 세 개의 수동 광도파로로 구성된 방향성 결합기로 되어 있다. 제작된 두 개의 서로 다른 직사각형 링 공진기의 능동 영역의 길이는 250과 350 μm 이고, 전체 공진기 길이는 각각 580과 780 μm 이다. 측정된 링 레이저의 문턱 전류는 상온에서 연속 전류를 인가했을 때 38 mA를 얻을 수 있었다. 이때 20 dB 이상의 인접모드 억압비를 갖는 단일 모드 발진 특성을 확인하였다.

Abstract

We have investigated the properties of the novel rectangular ring lasers containing active and passive regions in a InP material system. The rectangular ring laser consists of four low loss total internal reflection mirrors and a directional coupler made out of passive three waveguides. Two different lasers having active lengths of 250 and 350 μm and total cavity lengths of 580 and 780 μm are fabricated, respectively. For both devices lasing thresholds of 38 mA is obtained at room temperature and under continuous wave operation. Lasing is predominantly single mode with the side mode suppression ratio better than 20 dB.

Keywords : 전반사 미러(Total Internal Reflection Mirror), 방향성 결합기(Directional Coupler), 직사각형 링 레이저(Rectangular Ring Laser), 반도체 광 증폭기(Semiconductor Optical Amplifier)

I. 서 론

마이크로 링 레이저 다이오드는 콤팩트하고 집적도가 높아 광집적화 또는 바이오센서 시스템 집적화 등에 다양한 기능을 제공할 수 있는 소자이다. Fabry-Perot 레이저는 공진기를 형성하기 위해서 도파로를 절단해야 하지만, 링 레이저는 절단하지 않고 쉽게 다른 소자와 집적을 가능하게 한다. 특히 마이크로 링 레이저는 단

일 방향으로 공진을 하기 때문에 분포피환형 (DFB: Distributed Feedback) 레이저나 Fabry-Perot 레이저에서 발생하는 hole burning 효과를 피할 수 있는 장점이 있다. 이러한 장점들 때문에 링 레이저는 원형, 삼각형, 사각형 그리고 디스크 등의 다양한 형태로 연구되어 왔다.^[1~4] 그런데 마이크로 링 공진기를 InP 위에 실제로 구현하기 위해서는 고려해야 할 두 가지 중요한 요소가 있다. 첫 번째 요소는 콤팩트한 공진기를 형성해야 한다. 콤팩트한 링 공진기를 만들기 위해서는 광도파로 자체가 링 루프를 형성해야 한다. 일반적으로 광도파로를 이용해서 excessive radiation loss 없이 반경이 작은 링을 만들기 위해서는 광도파로 주변을 깊게 식각을 하는 것이다. 이렇게 광도파로 주변을 깊게 식각을 하면

* 정희원, 중앙대학교 전자전기공학부
(School of Electrical and Electronics Eng.,
Chung-Ang University)

※ 본 논문은 2007년도 중앙대학교 박사후연수과정
(Post-doc) 지원 사업에 의하여 연구되었음.

접수일자: 2008년4월5일, 수정완료일: 2008년7월17일

도파로의 측면 광가둠 효과를 높일 수 있지만, sidewall roughness 는 광 전파 손실을 증가시킨다. 또한 링 공진기를 형성하고 있는 도파로 자체가 진성 물질로 되어 있는 경우, 진성 물질을 통한 식각은 excessive surface recombination 때문에 문제가 야기된다. 더욱이 이러한 링 공진기는 radiation loss의 증가로 링의 직경을 줄이면서 콤팩트하게 만들기가 어렵게 된다. 이런 문제는 마이크로 링 공진기를 전반사 (TIR: Total Internal Reflection) 미러로 구현한다면 해결 될 수가 있다. 즉, 링 공진기를 일반적인 광도파로를 이용하여 구성하고, 링의 코너 부분에 전반사 미러를 삽입하여 아주 콤팩트한 마이크로 공진기를 구현할 수 있다. 두 번째 요소는 링 레이저 공진기와 출력 광도파로와의 효율적인 결합에 관한 것이다. 지금까지 보고된 출력 결합 방법으로는 Y 분기 결합,^[1] 수직결합,^[4] 다중모드 간섭 결합^[5] 등이 이용되었다. 기존의 링 공진기를 이용한 레이저 다이오드는 출력 도파로가 링과 같은 능동 도파로 구조로 이루어진게 대부분이어서, 소자에 전류를 인가함에 따라서 출력 도파로의 특성이 변하게 된다. 이런 문제는 링 공진기에서 출력되는 부분을 수동 도파로로 구성된 방향성 결합기를 이용하면 해결 할 수 있다.

본 논문에서 구현된 공진기는 기존의 구 형태의 링 공진기와는 다르게 링의 내부를 광도파로를 이용하여 구성하고, 링의 코너 부분에 전반사 미러를 삽입하여 아주 콤팩트한 직사각형 링 공진기를 구현하였다. 또한 링 공진기에서 출력을 얻기 위해서 세 개의 광도파로로 구성된 방향성 결합기를 이용하였다.^[6] 위의 공정은 일반적인 레이저 다이오드의 공정과 같아서 광변조기, 광검출기 또는 다른 광소자와 쉽게 집적을 할 수 있는 장점을 가지고 있다.

II. 링 공진기의 모의실험 및 결과

그림 1은 세 개의 광도파로로 구성된 방향성 결합기를 이용한 직사각형 링 공진기의 개략적인 도면이다. 링 공진기 내부는 일반적인 광도파로를 이용하여 구성하고, 링의 코너 부분에 전반사 미러를 삽입하여 아주 콤팩트한 직사각형 공진기 형태를 가지고 있다. 그리고 직사각형 공진기 내부의 한쪽 도파로만 능동 영역으로 구성하여, 전류가 인가되었을 때 능동 영역에서 충분한 광 이득을 얻어 공진기가 레이저 다이오드로 동작되도록 하였고, 나머지 영역은 수동 도파로로 구성하였다.

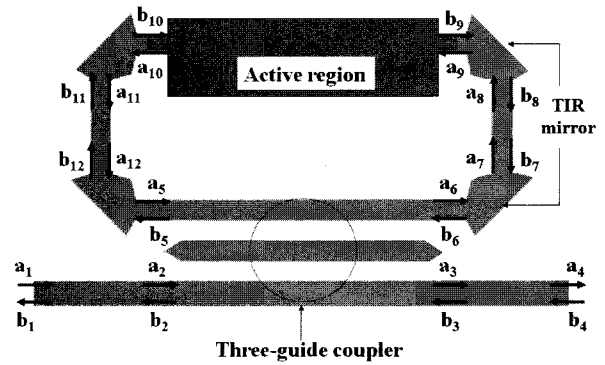


그림 1. 세 개의 광도파로로 구성된 방향성 결합기와 전반사 미러를 이용한 직사각형 링 공진기의 기본 구조

Fig. 1. Top schematic diagram of the rectangular ring resonator using four TIR mirrors and a three-guided coupler.

직사각형 링 공진기는 참고 문헌 [7]에서 이용되었던 전달행렬방법 (Transmission matrix method)을 이용하여 계산되었다.^[7] 그림 1의 각각의 영역에서 a_i 와 b_i 는 전향과 후향의 산란 파라미터이고, 공진기 내부의 전달 행렬식은 아래의 식 1과 같이 나타내어진다.

$$\begin{pmatrix} a_5 \\ b_5 \end{pmatrix} = T_{12} T_{11} T_{10} T_9 T_8 T_7 T_6 = \begin{pmatrix} a_6 \\ b_6 \end{pmatrix} = T_{Ring} \begin{pmatrix} a_6 \\ b_6 \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서, a_5 와 b_5 는 직사각형 링 공진기의 끝나는 부분에서 산란 파라미터이고, a_6 과 b_6 은 링 공진기의 시작하는 부분에서 산란 파라미터이다. 그리고 행렬 T_i 는 각각의 영역에서 산란 파라미터를 연결하고 있는 전달 행렬이다. 방향성 결합기에서 결합 행렬은 아래의 식 2로 표현된다.

$$\begin{pmatrix} a_3 \\ b_3 \\ a_6 \\ b_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_2 \\ b_2 \\ a_5 \\ b_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{1-K^2} e^{-i\phi} & 0 & iKe^{-i\phi} & 0 \\ 0 & \sqrt{1-K^2} e^{i\phi} & 0 & -iKe^{i\phi} \\ iKe^{-i\phi} & 0 & \sqrt{1-K^2} e^{-i\phi} & 0 \\ 0 & -iKe^{i\phi} & 0 & \sqrt{1-K^2} e^{i\phi} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_2 \\ b_2 \\ a_5 \\ b_5 \end{pmatrix} \quad (2)$$

이때,

$$K = \frac{\kappa}{\sqrt{\kappa^2 + \delta^2}} \sin(\sqrt{\kappa^2 + \delta^2} \cdot l) \quad (3)$$

여기서, κ 는 결합 계수이고, δ 는 모드분산 그리고 l 는

방향성 결합기의 길이이다. 따라서 링 공진기와 방향성 결합기의 행렬 관계식은 식 1과 2를 이용하여 아래의 관계식을 유도할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} a_3 \\ b_3 \end{pmatrix} = [C_{11} + C_{12}T_{Ring}(I - C_{22}T_{Ring})^{-1}C_{21}] \begin{pmatrix} a_2 \\ b_2 \end{pmatrix} = \tilde{T} \begin{pmatrix} a_2 \\ b_2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

결과적으로 직사각형 링 공진기의 최종 전달행렬은 그림 1에서 입력과 출력 부분의 산란 파라미터를 식 4에 적용하면 다음 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{pmatrix} a_4 \\ b_4 \end{pmatrix} = T_3 \tilde{T} T_1 \begin{pmatrix} a_1 \\ b_1 \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} a_1 \\ b_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ b_1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

직사각형 링 공진기의 출력 도파로에서 초기에 반사가 없다면 $b_4 = 0$ 이다. 이러한 초기 조건을 이용해서 출력되는 파워에 관련된 수식을 구할 수 있다.

$$T = \frac{|a_4|^2}{|a_1|^2} = \left| \frac{T_{11}T_{22} - T_{12}T_{21}}{T_{22}} \right|^2 \quad (6)$$

그림 2는 직사각형 링 공진기 내부에 있는 능동 영역의 길이가 $250 \mu\text{m}$ 이고, 공진기의 전체 길이가 $580 \mu\text{m}$ 일 때, 공진기 내부의 능동 영역에서 발생하는 광 이득의 양에 따른 공진 특성을 보여주는 그래프이다. 방향성 결합기에서 결합되는 결합 계수는 0.7이고, 공진기 내부의 수동 광도파로에서 발생하는 광 손실은 10 dB/cm라고 가정했다. 그리고 공진기 내부의 전반사 미러에서 발생하는 미러 손실은 기존의 실험값에서 얻어

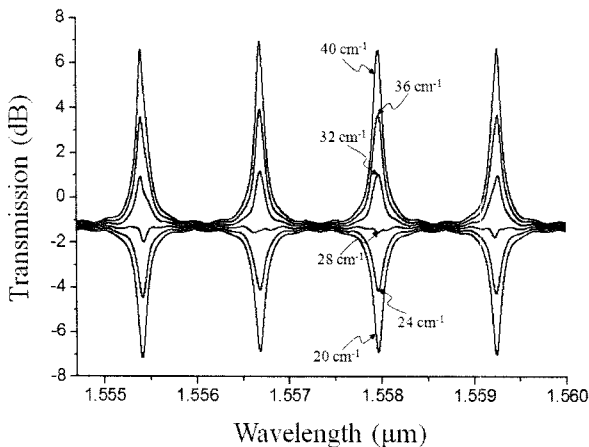


그림 2. 능동 영역에서 발생하는 광 이득에 따른 공진 특성
Fig. 2. Calculated optical transmission of the ring resonator as a function of the optical gain.

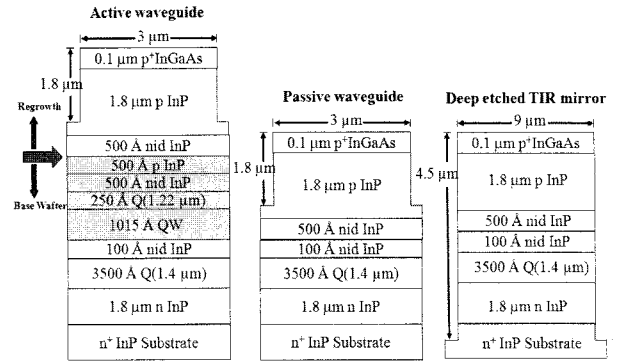


그림 3. 실험에서 사용된 능동 및 수동 광도파로 구조
Fig. 3. Cross sectional profile of the active and the passive waveguide structure used in the experiments.

진 0.7 dB/mirror 의 값을 이용하였다.^[8] 그림 2에서 아래쪽 방향으로 공진이 발생한 것은 능동 영역에서 발생한 이득이 28 cm^{-1} 보다 작을 때, 공진기가 광 필터로서 동작하는 것을 보여준다. 그런데 능동 영역에서 발생하는 이득이 충분히 커지게 되면 공진기는 광 증폭기와 같은 역할을 하게 된다. 따라서 능동 영역에서 광 이득이 28 cm^{-1} 이상이 되도록 충분한 전류를 인가하면 공진기는 광 필터가 아니라 링 레이저 다이오드로서 발진 특성을 보이게 된다. 그림 2의 위쪽 방향으로 공진이 발생한 것이 이와 같은 발진 특성을 나타내는 것을 보여준다. 즉 링 공진기 내부에 삽입된 능동 영역에 전류가 인가되면, 능동 영역에서 발생된 광이 공진기 내부를 주회하게 된다. 공진기 내부를 주회하는 광이 계속해서 주입되는 전류에 의해서 공진기 내부의 수동 도파로와 전반사 미러에서 발생하는 광 손실을 극복할 만큼 충분히 증가하게 되면 공진 조건에 맞는 파장만을 방향성 결합기를 통해서 출력되어진다.

III. 실험 및 결과

그림 3은 실험에서 이용된 직사각형 링 공진기 내부의 능동 구조와 광도파로의 수동구조 및 전반사 미러에서 깊게 식각된 구조를 나타내는 그래프이다. 광도파로에서 광이 전파되는 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 InP 물질로 되어있다. 광 증폭기의 능동 영역은 $0.1 \mu\text{m}$ 두께의 다중양자 우물 층으로 구성되어 있었는데, 두께가 65 \AA 인 7개의 우물과 두께가 80 \AA 인 장벽으로 구성이

되어 있다.^[9] 능동과 수동 도파로 폭은 $3\ \mu\text{m}$ 이고, 광도파로가 단일 모드를 형성하기 위해서 식각 깊이는 $1.8\ \mu\text{m}$ 이다. 공진기를 만들기 위해서는 한 번의 재성장(regrowth)이 필요한데, 초기에 성장된 웨이퍼 구조는 그림 3의 능동 도파로 구조에서 옆으로 표시되어 있는 화살표 방향까지, 즉 다중양자 우물 층까지 성장이 되어 있다. 이 구조에서 광 증폭기를 만들 영역을 제외한 나머지 부분, 즉 수동 도파로를 만들기 위해서는 능동층을 식각해서 제거한다. 이렇게 제거를 한 다음에 $1.8\ \mu\text{m}$ 의 두께의 p형 InP 층과 $0.1\ \mu\text{m}$ InGaAs 전극 부분을 위한 층을 재성장 한다. 이 공정은 단지 한 번의 재성만 필요할 뿐 수직 결합기에서 요구하는 웨이퍼 본딩이 필요 없다. 이러한 공정은 전반사 미러를 만들기 위해서 요구되는 깊게 식각하는 것을 제외하면 일반적인 광 반도체 레이저 공정과 같다. 그림 4는 링 공진기를 구성하는 방향성 결합기와 전반사 미러의 식각된 후의 SEM 사진이다. 여기서 전반사 미러는 반도체로 미러면을 형성하기 위해서 $4.5\ \mu\text{m}$ 까지 깊게 식각이 되었다. 전반사 미러를 이용하게 되면, 기존의 링 구조에서 radiation loss를 줄이기 위해서 도파로 주변을 깊게 식각을 해야 하는 필요성이 없고, 또한 링 공진기 자체를 직각 형태로 제작할 수 있어서 링 공진기 크기를 줄일 수 있다. 이러한 직각 형태의 링 공진기는 전체 시스템 집적도를 향상시킬 수 있을 것이다. 그러나 링 공진기에 이용되는 전반사 미러는 링 공진기의 공진 조건을 형성하기 위해서 최소의 미러 손실을 유지해야 한다. 저손실 미러를 형성하는 방법은 첫 번째로 자동 정렬



그림 4. 방향성 결합기와 전반사 미러 부분의 식각된 사진

Fig. 4. Scanning electron microscope picture of the three-guided coupler and the TIR mirror.

방법에 의해서 제작되어야 하고, 두 번째로 식각되는 미러 면이 수직 형태를 유지하고, 거칠지 않아야 한다. 제작된 전반사 미러의 손실은 $0.7\ \text{dB/mirror}$ 를 얻을 수 있었다.^[8] $1\ \text{dB}$ 보다 적은 미러 손실은 링 공진기를 직각 형태로 제작을 가능하게 한다. 그림 4에서 직사각형 링 공진기의 출력을 위해서 세 개의 수동 광도파로로 구성된 방향성 결합기를 보여준다. 일반적으로 방향성 결합기는 두 개의 광도파로를 이용하여 구성되는데, 기존의 방향성 결합기에서 충분한 출력을 얻기 위해서는 결합기 간격이 가까워야 한다. 하지만 본 실험 구조에서 결합기 간격이 가까워지면, 출력 도파로와 전반사 미러의 깊게 식각된 블록의 끝 부분과 사이가 가까워지게 되고, 이 끝 부분에서 원치 않는 반사파를 유도하게 된다.

미러 끝부분에서 발생하는 반사파를 제거하기 위해서 방향성 결합기 사이에 도파로를 삽입하여 미러와 출력 도파로 사이의 간격을 크게 하였다. 삽입된 가운데 도파로에 결합된 파워의 반사를 제거하기 위해서 양끝은 테이퍼 구조로 하였다. 그리고 방향성 결합기의 간격은 $1.5\ \mu\text{m}$ 하여 제작 되었다. 수동 도파로로 구성된 방향성 결합기에서 광 파워가 얼마나 전달되고 결합되는지를 알기 위해서 광전송방법 (BPM: Beam Propagation Method)을 이용하여 계산하였다. 결합기의 길이가 $250\ \mu\text{m}$ 일 때 전달되는 파워의 양은 $82\ \%$ 이고 결합되는 양은 $1\ \%$ 이다. 그리고 길이가 $350\ \mu\text{m}$ 일 때 전달되는 파워의 양은 $68\ \%$ 이고 결합되는 양은 $3\ \%$ 이다. 즉, 결합기에 의해서 손실되는 파워는 길이가 $250\ \mu\text{m}$ 일 때 $17\ \%$ 이고, $350\ \mu\text{m}$ 일 때 $29\ \%$ 이다. 기존의

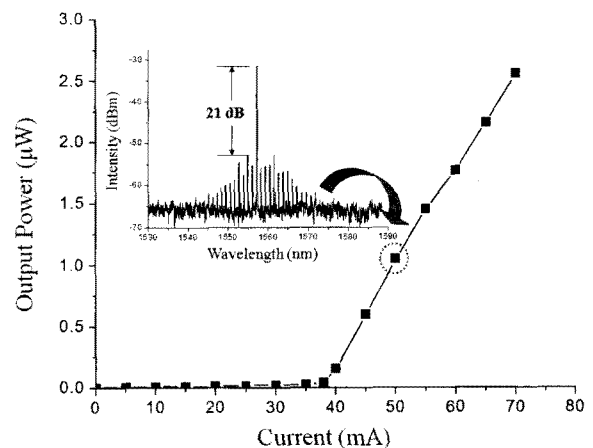


그림 5. 링 레이저의 인가 전류에 따른 출력 파워

Fig. 5. Light output versus current characteristics of a ring laser.

방향성 결합기 가운데에 광도파로를 삽입하여 원치 않는 반사파를 제거할 수 있었지만, 계산 결과에서 보여 주듯이 결합되는 파워의 양이 작아서 출력되는 파워가 크지 않을 것을 예측할 수 있었다. 실험 공정에 관련된 내용은 기존에 발표된 참고 문헌 [10]에 자세하게 설명되어 있다. 그림 5는 직사각형 링 레이저 내부에 있는 능동 도파로에 연속 전류를 인가했을 때 발진 특성을 보여준다. 링 레이저의 능동 영역의 길이는 250 μm 이고, 링의 전체 길이는 580 μm 이다. 측정된 직사각형 링 레이저의 문턱 전류는 20 $^{\circ}\text{C}$ 에서 대략 38 mA이다.

그림 6은 링 레이저 내부에 있는 능동 도파로에 전류를 35 에서 55 mA로 가변을 시키면서 측정된 광 출력의 스펙트럼을 분석한 그래프이다. 측정된 공진 모드 간격은 대략 1.12 nm이다. 이것은 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ 와 $L=580 \mu\text{m}$ 일 때, $\Delta\lambda=\lambda^2/(nL)$ 에 의해서 계산된 공진기의 FSR (Free Spectral Range)와 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 또한 문턱 전류의 1.3배를 인가했을 때, 인접모드 억압비 (SMSR: Side Mode Suppression Ratio)가 대략 21 dB임을 알 수 있었다.

그림 7은 직사각형 링 레이저 내부에 있는 능동 도파로에 연속 전류를 인가했을 때 발진 특성을 보여준다. 링 레이저의 능동 영역의 길이는 350 μm 이고, 링의 전체 길이는 780 μm 이다. 측정된 직사각형 링 레이저의 문턱 전류는 20 $^{\circ}\text{C}$ 에서 대략 38 mA이다. 그림 8은 링

레이저 내부에 있는 능동 도파로에 전류를 35 에서 50 mA로 가변을 시키면서 측정된 광 출력의 스펙트럼을 분석한 그래프이다. 측정된 공진 모드 간격은 대략 0.847 nm이다. 또한 문턱 전류의 1.8배를 인가했을 때, 인접모드 억압비가 대략 23 dB임을 알 수 있었다. 두 경우에 방향성 결합기의 작은 결합력으로 인해서 파워의 양이 작게 출력되는 것을 확인할 수 있다. 두 경우를 비교해 볼 때, 능동 영역의 길이와 전체 공진기의 길이가 증가했는데도 문턱 전류는 거의 같게 나왔다. 능동 영역의 길이를 증가시키면 공진기 내부에 있는 전반사

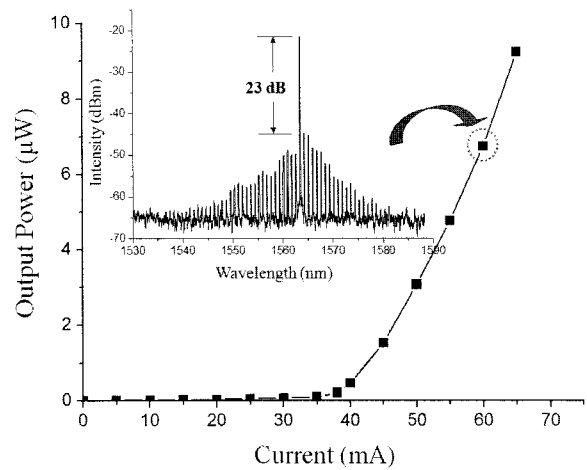


그림 7. 링 레이저의 인가 전류에 따른 출력 파워
Fig. 7. Light output versus current characteristics of a ring laser.

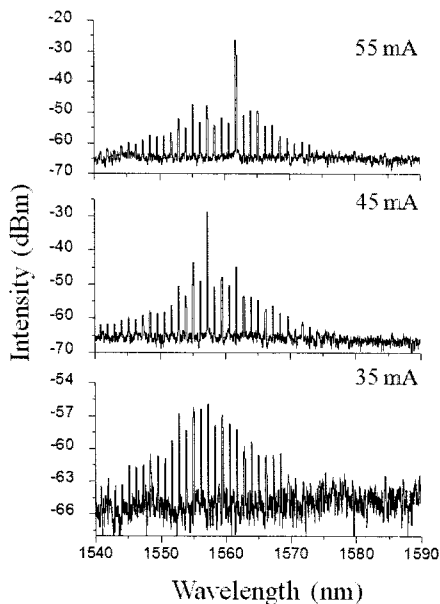


그림 6. 링 레이저의 인가 전류에 따른 출력 스펙트럼
Fig. 6. Output spectrum at different bias currents of a ring laser.

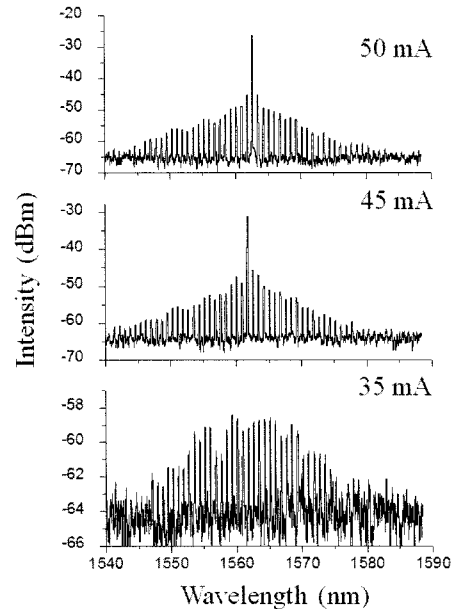


그림 8. 링 레이저의 인가 전류에 따른 출력 스펙트럼
Fig. 8. Output spectrum at different bias currents of a ring laser.

미러의 유효 손실 계수를 감소시키지만, 공진기 전체 길이가 증가하게 되어 공진기 내부에 있는 수동 도파로의 손실 계수를 증가 시키고, 결합 영역의 길이를 증가 시키게 된다. 증가된 결합 영역의 길이는 공진기에서 출력 도파로로 결합되는 파워의 양을 증가시켜 공진기 내부의 주회하는 손실 계수를 증가시키게 된다. 따라서 실험에서 얻어진 결과를 바탕으로 계산 값과 피벗을 했을 때 두 경우의 문턱 전류가 크게 차이가 나지 않음을 확인할 수 있었다. 그리고 그림 1에서 제시된 직사각형 링 공진기의 실제 제작된 구조는 다른 응용 실험을 위해서 링 공진기 외부에 공진기 내부에 있는 능동 도파로와 같은 구조를 갖는 2 mm 의 길이의 광 증폭 영역이 집적되어 있다. 따라서 링 공진기에 전류를 인가했을 때 양방향에서는 발진 특성을 확인할 수 없었고, 한 쪽 방향에서만 발진 특성을 확인할 수 있었다.

IV. 결 론

본 연구에서는 InP 물질을 기반으로 능동과 수동 광도파로를 포함하는 신개념의 직사각형 링 레이저를 제작하여 그 특성을 측정하고 분석하였다. 직사각형 링 레이저의 구성은 작은 광 손실을 갖는 네 개의 전반사 미러와 세 개의 수동 광도파로로 구성된 방향성 결합기로 되어 있다. 제작된 두 개의 서로 다른 직사각형 링 공진기의 능동 영역의 길이는 250과 350 μm 이고, 전체 공진기 길이는 각각 580과 780 μm 이다. 측정된 링 레이저의 문턱 전류는 상온에서 연속 전류를 인가했을 때 대략 38 mA를 얻을 수 있었다. 이때 20 dB 이상의 인접모드 억압비를 갖는 단일 모드 발진 특성을 확인하였다. 그러나 두 경우에 방향성 결합기의 작은 결합력으로 인해서 파워의 양이 작게 출력되는 것을 확인할 수 있었다. 출력되는 광 파워의 양을 크게 하기 위해서는 다음과 같은 구조적인 최적화 접근이 필요하다고 본다. 첫 번째로 방향성 결합기의 출력 도파로를 전파 손실이 크지 않는 범위 내에서 s형태의 곡선으로 최적화를 한다면 출력 파워를 증가시킬 수 있을 것으로 본다. 두 번째로 전반사 미러의 구조에서 diffraction되는 영역을 가능한 작게 만들고, 깊게 식각되는 영역을 최소로 한다면 방향성 결합기를 다르게 구성할 수 있어서 출력되는 파워를 증가시킬 수 있을 것이다. 본 실험에서 이루어진 공정은 일반적인 레이저 다이오드의 공정과 같아서 광변조기, 광검출기 또는 다른 수동 광소자와 쉽게

집적을 할 수 있는 장점을 가지고 있어서 광집적화 또는 바이오 시스템 집적화 등에 이용될 수 있을 것으로 본다.

참 고 문 헌

- [1] J. P. Hohimer, D. C. Craft, G. R. Hadley, G. A. Vawter, and M. E. Warren, "Single-frequency continuous-wave operation of ring resonator diode laser," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 59, pp. 3360-3362, 1991.
- [2] C. Ji, M. H. Leary, and J. M. Ballantyne, "Long-Wavelength triangular ring laser," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 9, pp. 1469-1471, 1997.
- [3] S. Oku, M. Okayasu, and M. Ikeda, "Low-threshold CW operation of square-shaped semiconductor ring lasers (orbiter lasers)," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 3, pp. 588-590, 1991.
- [4] S. J. Choi, K. Djordjev, S. J. Choi, and P. D. Dapkus, "Microdisk lasers vertically coupled to output waveguides," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 15, pp. 1330-1332, 2003.
- [5] T. Krauss, R. M. De La Rue, I. Gontijo, and P. J. R. Laybourn, "Strip-loaded semiconductor ring lasers employing multimode interference output couplers," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 64, pp. 2788-2790, 1994.
- [6] H. A. Haus and C. G. Fonstad, "Three-waveguide couplers for improved sampling and filtering," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-17, no.12, pp.2321-2325, Dec. 1981.
- [7] Jong Chang Yi, Doo Gun Kim, and Nadir Dagli, "Self-aligned total internal reflection mirrors for micro-ring cavity resonators," *Optoelectron. and Commun. Conf. Proc.*, Paper 7P80, Seoul, July 4-8, 2005.
- [8] Doo Gun Kim, Cem Ozturk, Jae Hyuk Shin, Jong Chang Yi, and Nadir Dagli, "Self-aligned total internal reflection mirrors with very low loss," in *Integrated Photonics Research Conf. Proc.*, IThG5, San Francisco, CA, Jun. 30-Jul. 2, 2004.
- [9] 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.
- [10] 김두근, 최윤경, 최영완, 이종창, "최적의 다중모드 간섭기로 결합된 직사각형 링 공진기", *대한전자공학회지*, vol. 44, pp. 26-35, 2007.11

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>