

논문 2007-44SD-11-5

# 최적의 다중모드 간섭기로 결합된 직사각형 링 공진기

(Rectangular ring resonator with optimum multimode interference)

김 두 근\*, 최 운 경\*, 최 영 완\*, 이 중 창\*\*

(Doo Gun Kim, Woon-Kyung Choi, Young-Wan Choi, and Jong Chang Yi)

## 요 약

본 연구에서는 광집적회로를 구성하기 위해서 InP 기판위에 아주 작은 다중모드 간섭기를 결합기로 사용하고, 직사각형 링 공진기 내부는 전반사 거울로 구성된 필터를 제작하여 그 특성을 측정 분석하였다. 최적의 다중모드 간섭기의 길이와 폭은  $110\ \mu\text{m}$ 와  $9\ \mu\text{m}$ 로 하여 빛이 광 도파로를 따라 진행할 때 링으로 결합되는 파워를 높였다. 링 공진기 내부의 광도파로와 전반사 거울에서의 손실을 보상하기 위해서 링 공진기 내부에 길이가  $120\ \mu\text{m}$ 인 반도체 광 증폭기를 집적하였다. 측정된 공진기의 FSR는 대략  $2\ \text{nm}$  ( $244\ \text{GHz}$ )이고 소광비는  $13\ \text{dB}$ 이다. 또한 곡선 피팅에 의해서 파워 결합력은 대략  $42\%$ 를 얻을 수 있었다. 이러한 조건에서 임계 결합을 얻기 위해서는  $2.4\ \text{dB}$ 의 공진기 내부 손실이 요구된다.

## Abstract

We characterized the properties of the fabricated filter with the total internal reflection mirror (TIR) in the rectangular ring resonator and very small multimode interference (MMI) couplers on an InP material platform for photonic integrated circuits. Coupling power in and out of a resonator is increased by using an optimum MMI length of  $110\ \mu\text{m}$  and a width of  $9\ \mu\text{m}$ , respectively. The semiconductor optical amplifier with the length of  $120\ \mu\text{m}$  is integrated in the resonator to compensate the loss of the internal waveguide and the TIR mirror. A free spectral range of approximately  $2\ \text{nm}$  ( $244\ \text{GHz}$ ) is observed with an on-off ratio of  $13\ \text{dB}$ . The curve fitting also yields the power coupled per pass as  $42\%$ . To reach critical coupling at this coupling level would require a round trip loss of about  $2.4\ \text{dB}$ .

**Keywords:** 전반사 거울 (Total Internal Reflection Mirror), 다중모드 간섭기(Multimode Interference),

반도체 광 증폭기(Semiconductor Optical Amplifier), 직사각형 링 공진기(Rectangular Ring Resonator)

## I. 서 론

광집적 회로에 있어서 특정 파장을 선택할 수 있는 파장 가변 필터는 필수적인 소자이다.<sup>[1~3]</sup> 파장 가변 필터 소자는 현재까지 많은 방법이 시도되었지만, 집적화를 위해서는 InP 기반의 도파로형 필터가 필수적이라 생각된다. 링이나 디스크 같은 잘 알려진 마이크로 공

진기 소자는 이러한 시스템 집적화에 다양한 기능을 제공할 수 있는 소자이다. 마이크로 링 공진기는 콤팩트(compact)하고 높은 파장 선택성과 집적도를 높일 수 있는 특성을 가지고 있다. 또한 마이크로 공진기 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.<sup>[4~5]</sup> 그런데 마이크로 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 식각해야 한

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

\*\* 정희원, 홍익대학교 전자전기공학부  
(School of Electronics and Electrical Eng., Hong Ik  
University)

※ 본 논문은 'ERC OPERA (R11-2003-022)'와 'Seoul R&D program' 지원에 의한 것임.

접수일자: 2007년6월15일, 수정완료일: 2007년10월17일

다. 이렇게 광도파로 주변을 깊게 식각하면 도파로의 측면 광구속 효과를 높일 수 있지만, sidewall roughness가 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 만들기 어렵게 된다. 이런 문제는 링 공진기가 전반사 (Total Internal Reflection: TIR) 거울로 구현된다면 해결 될 수 있다. 즉, 링 공진기가 일반적인 광 도파로를 이용하여 구성되고, 링의 코너부분에 전반사 거울이 삽입되어 아주 콤팩트한 마이크로 공진기가 구현될 수 있다.

두 번째 요소는 빛이 광 도파로를 따라 진행할 때 링 공진기로 결합되는 파워가 충분히 커야 한다. 일반적으로 결합기가 측면 결합으로 될 경우, 측면 결합 간격은 서브 마이크로이 요구된다.<sup>[6]</sup> 결합기의 서브 마이크로 간격은 공정의 재연성을 어렵게 만든다. 그러나 이런 짧은 간격에서의 강한 결합기는 수직 결합기를 사용하여 만들 수 있지만, 수직 결합은 일반적으로 웨이퍼 본딩 (wafer bonding)<sup>[7]</sup>이나 substrate removal<sup>[8]</sup>에 의해서 만들어진다. 따라서 이러한 공진기들은 일반적인 레이저 공정순서에 맞지 않아서 같은 플랫폼에 집적화를 어렵게 만든다. 따라서 이러한 공진기들을 같은 플랫폼에 쉽게 집적할 수 있는 공정을 개발해야 한다.

본 연구에서는 위에서 언급한 두 가지 문제를 해결하기 위해서, 마이크로 링 공진기는 전반사 거울을 이용하여 링의 전체 길이를 줄였고, 광 도파로에 광 증폭기를 삽입하여 광 도파로와 거울에서 발생하는 손실을 극복하였다. 링 공진기의 결합기로는 아주 작은 다중모드 간섭기를 이용하여 빛이 광 도파로를 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.

## II. 링 공진기의 구성

### 1. 링 공진기의 기본 원리

InP 기반위에 광 집적을 하기위한 마이크로 공진기 필터의 기본적인 band stop filter의 개략적인 구조가 그림 1에 나타나 있다. 마이크로 공진기의 중요한 요소 중의 하나는 충분한 크기의 FSR(free spectral range)를

확보하는 것이다. FSR는 링이나 디스크의 공진기의 크기에 반비례하므로 링의 크기를 줄이면 되지만, 너무 작게 줄이게 되면 손실이 너무 커져서 좋은 필터 특성을 얻을 수가 없게 된다. 일반적으로 큰 FSR을 얻기 위해서는 단일 링을 직렬이나 병렬로 연결해서 FSR을 확장시키게 된다. 여러 개의 링을 연결하기 위해서는 우선 단일 링에서 최적의 필터 특성을 얻어야 병렬이나 직렬로 연결 되었을 때 큰 FSR을 갖으면서 좋은 필터 특성을 얻을 수 있다. 따라서 실제 제작에 앞서 계산을 통해 단일 링의 최적화된 구조분석이 선행되어야 한다. 그림 1의 4개의 포트를 갖는 결합기에서 링 안에서 반사가 없다면 초기 조건은  $b_1=b_3=a_2=a_4=0$  이다. 따라서 band stop filter의 함수를 아래처럼 표현할 수 있다.<sup>[9]</sup> 여기에서  $|k^2|$ 는 광도파로를 한번 진행할 때 포트 1에서 포트 4로 결합된 파워의 양이다.  $|t^2|$ 는 광도파로를 한번 진행할 때 결합되지 않고 진행한 파워의 양이다.

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \sqrt{1-k^2} & 0 & jk \\ \sqrt{1-k^2} & 0 & jk & 0 \\ 0 & jk & 0 & \sqrt{1-k^2} \\ jk & 0 & \sqrt{1-k^2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} \quad (1)$$

또한 링 공진기 내부에서,

$$a_3 = b_4 e^{-(\alpha_R + j\phi_R)} \quad (2)$$

로 표현된다. 여기에서  $\alpha_R$ 는 링 공진기 내부에서 한번 진행할 때 생기는 손실이고,  $\phi_R$ 는 링 공진기 내부에서 한번 진행할 때 생기는 위상차이다. 식(1)에서 아래의 관계식을 유도할 수 있다.

$$b_1 = \sqrt{1-k^2} a_2 + jka_4$$

$$b_2 = \sqrt{1-k^2} a_1 + jka_3$$

$$b_3 = jka_2 + \sqrt{1-k^2} a_4$$

$$b_4 = jka_1 + \sqrt{1-k^2} a_3$$

식(2)와 (3)으로부터 다음 관계식을 얻을 수 있다.

$$b_2 = \left[ \frac{\sqrt{1-k^2} - e^{-(\alpha_R + j\phi_R)}}{1 - \sqrt{1-k^2} e^{-(\alpha_R + j\phi_R)}} \right] a_1 \quad (4)$$

$$b_4 = \left[ \frac{jk}{1 - \sqrt{1-k^2} e^{-(\alpha_R + j\phi_R)}} \right] a_1 \quad (5)$$

그리고 식(4)와 (5)는  $\phi = 2m\pi$ 일 때, 링의 공진이 발생하게 되고,

$$b_2 = \left[ \frac{\sqrt{1-k^2} - e^{-\alpha_R}}{1 - \sqrt{1-k^2} e^{-\alpha_R}} \right] a_1 \tag{6}$$

$$b_4 = \left[ \frac{jk}{1 - \sqrt{1-k^2} e^{-\alpha_R}} \right] a_1 \tag{7}$$

로 된다. 식(6)에서 아래와 같은 조건을 만족할 때, 출력포트는 임계 결합조건이 만들어져 출력이 나오지 않게 된다.

$$\sqrt{1-k^2} = e^{-\alpha_R} \tag{8}$$

또한 이 조건은 식(7)에서, 링으로 결합되는 파워가 가장 클 때임을 말해준다.

즉,

$$\frac{d|b_4|}{dk} = \frac{\sqrt{1-k^2} - e^{-\alpha_R}}{(1 - \sqrt{1-k^2} e^{-\alpha_R})^2} = 0 \tag{9}$$

이다. 공진상태에서 임계 결합조건은 결합계수와 손실계수의 조정으로 실현될 수 있다. 손실계수는 링 공진기 내부에 광 증폭기를 삽입한다면 쉽게 조정할 수 있다. 링 공진기 내부에 광 증폭기를 구현하게 되면, 내부 손실을 극복할 뿐만 아니라, 필터의 파장까지 튜닝할 수 있는 장점이 있다.

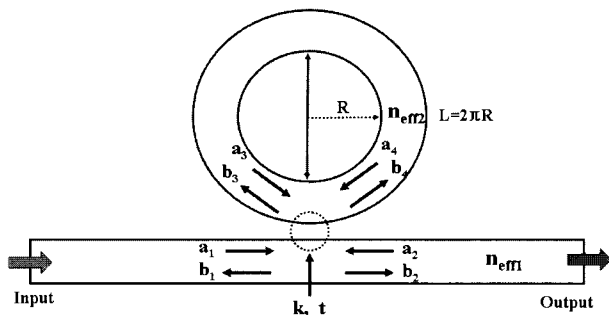


그림 1. 단일 band stop filter의 기본 구조  
Fig. 1. Schematic diagram of single band stop filter.

## 2. 반도체 전반사 거울

### 가. 전반사 거울의 계면 특성

InGaAsP 물질에서 손실이 적은 전반사 거울을 실현하기 위해서는 첫 번째로 구조적인 최적화가 필요하고,

두 번째로 자동 정렬(self-aligned)된 공정변수를 알아야 한다. 반도체에서 전반사 거울은 광도파로를 깊게 식각해서 만들어지는데, 이때 반도체와 공기면의 임계각은 16°이다. 일반적으로 평면파가 전반사 거울을 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. 이러한 위상차이 때문에 굴절률이 높은 물질에서 전반사를 겪은 평면파는 실제로 존재하는 물리적인 계면보다 조금 바깥쪽에 완전한 거울로부터 반사를 했다고 생각되어 질 수 있다. 따라서 실제 전반사 거울을 디자인할 때 물리적인 계면을 약간 안쪽으로 위치를 잡아야 한다. 그림 2는 거울 사이에 광도파로를 삽입한 구조로, 전반사 거울 계면의 위치에 따른 광 손실을 유한 차분 시간 영역(FDTD: Finite Difference Time Domain) 방법을 이용해서 계산한 결과이다. 그림 2의 내부의 왼쪽 위에 삽입된 그림은 거울 계면의 offset의 방향을 나타내주는 것으로 바깥쪽은 마이너스이고 안쪽은 플러스로 표시하였다. 중앙에 있는 그림은 광모드가 입력되어 두 개의 전반사 거울을 경험하고 출력되는 것을 나타낸다. 거울 계면의 최적의 offset은 거울 계면이 안쪽으로 0.1 μm 들어갔을 때 최소의 거울 손실을 갖는다. 이때의 거울 손실은 대략 1.47 dB/mirror pair이다. 그림 2의 결과는 거울 계면을 식각한 다음에 거울 면이 공기 중에 노출된 상태라고 가정하고 모의실험을 했다. 그런데 그림 3에서 보면 거울 계면의 굴절률이 바뀌면 거울 손실도 달라진다. 여기서 거울의 굴절률은 거울 면에 공기와 굴절률이 다

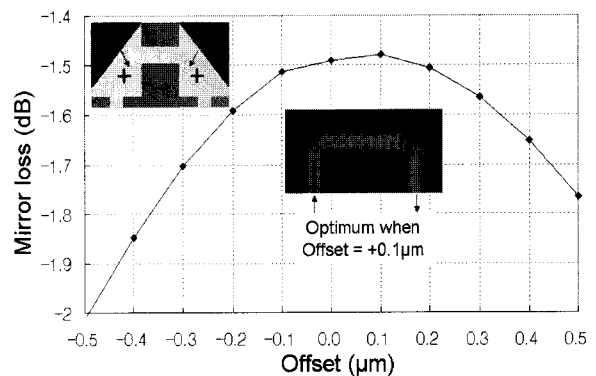


그림 2. 거울 사이에 도파로가 있는 구조에서의 거울 손실

Fig. 2. Mirror loss for corner reflector with focusing waveguide.

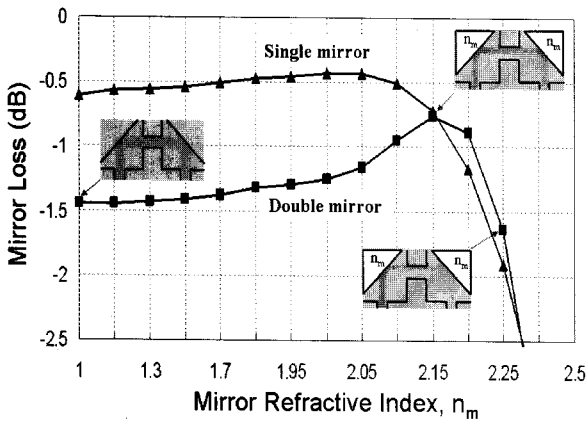


그림 3. 거울 계면의 굴절률에 따른 손실  
 Fig. 3. Mirror loss with respect to the refractive index of the mirror interface.

큰 물질로 코팅을 하였다고 가정을 하였고,  $n_m$ 으로 표시를 하였다. 그림 3에서 거울이 쌍으로 되어 있는 곡선을 보면, 거울면이 공기 중에 노출되어 있을 때보다 굴절률이 1보다 큰 물질로 코팅되었을 경우 거울 손실이 줄어드는 것을 보여준다. 즉, 굴절률이 2.15 일 때 가장 적은 거울 손실을 갖는다. 이때의 거울 손실은 대략 0.75 dB이고 물질은  $TiO_2$  이다. 그러나 본 연구에서는 실험실 여건상  $TiO_2$ 를 사용하지 않고, 공정변수가 잘 잡혀있는  $SiN_x$ 를 사용하여 코팅을 하였다. 이때의 굴절률은 대략 1.9이었다. 따라서 이론적인 최소의 거울 손실은 대략 1.32 dB라고 가정을 하고 실험을 하였다.

나. 전반사 거울의 제작 및 측정

그림 4의 왼쪽은 실제 실험에 사용된 광도파로의 구조이고 가운데는 전반사 거울의 윗면을 2개에서 8개까지 나타낸다. 오른쪽에 거울의 확대된 그림은 자동 정렬 공정에 사용된 광도파로 마스크와 깊게 식각되는 영역을 보여준다.

그림 5는 거울의 제작 공정이다. (a) 공정은 PECVD를 이용해서 웨이퍼에  $SiN_x$ 를 120 nm를 증착하였다. 이렇게 증착된 웨이퍼를 가지고 (b)의 리소그래피 공정을 이용해서 패턴을 형성하였다. 패턴이 형성된 웨이퍼를 (c) 공정의  $CF_4$  플라즈마를 이용해서  $SiN_x$ 를 식각하고, 포토리지스터를 제거하면  $SiN_x$ 로만 패턴이 형성된다.  $SiN_x$ 로만 패턴이 형성된 웨이퍼를 (d) 공정의 RIE 장비를 이용해서 1.85  $\mu m$ 까지 식각하면 광도파로와 거울을 형성할 수 있다. RIE 장비의 공정 변수는  $CH_4:H_2:Ar(4:20:10$  sccm)이고, 챔버의 압력은 75 mT, 파워는 130 W이다. 이때 광 도파로의 폭은 3  $\mu m$ 이다.

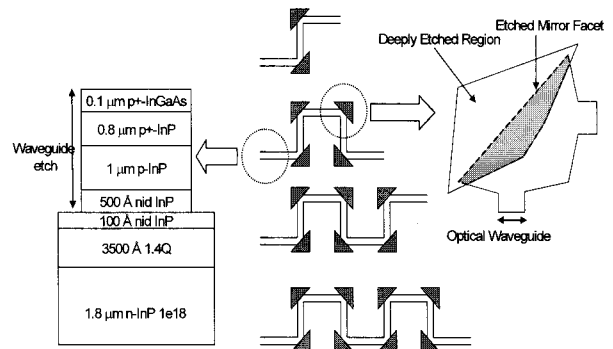


그림 4. 실험 제작에 사용된 전반사 거울의 개략도와 광도파로의 구조  
 Fig. 4. Cross sectional profile of the optical waveguide and the top schematic of the TIR mirrors used in the experiments.

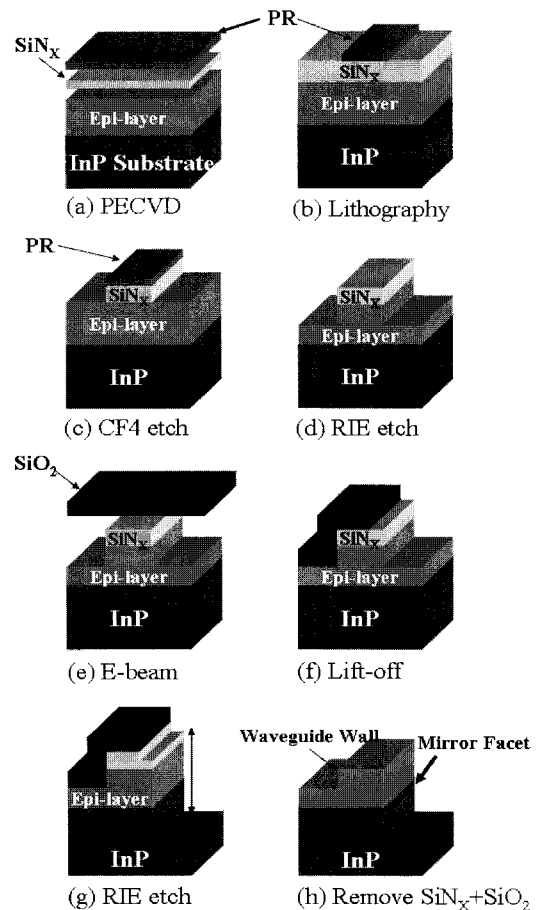


그림 5. 전반사 거울의 제작 공정  
 Fig. 5. Fabrication process of TIR mirrors.

첫 번째 식각의 목적은 광 도파로가 싱글모드가 되도록 식각을 하는 것이기 때문에 거울 부분이 충분히 식각되지 않은 상태이다. 그러나 거울 면에서 광 모드를 충분히 커버하기 위해서는 거울 부분을 충분히 식각을 해야 한다. 따라서 거울 부분을 충분히 식각을 하기 위해서는 (e) 공정과 (f) 공정의 lift-off 방법으로 리소그래피

공정을 수행한다. E-beam 증착 장비를 이용해서 SiO<sub>2</sub>를 300 nm 증착을 한 후, lift-off 방법으로 거울 부분만 SiO<sub>2</sub>를 제거한다. 이렇게 형성된 패턴을 (g) 공정의 RIE 장비를 이용해서 거울 부분을 4.5 μm까지 식각을 한다. 마지막으로 (h) 공정에서처럼 HF를 이용해서 SiNx와 SiO<sub>2</sub>를 완전히 제거한다.

전반사 거울의 부가적인 손실을 알기 위해서 우선 기준 광도파로의 출력 파워를 측정하였다. 이렇게 측정된 광도파로 파워를 가지고 전반사 거울에서 측정된 파워와 비교하였다. 그림 6은 거울 개수에 따른 손실을 측정된 결과이다. 측정된 손실은 한개의 거울당 1.4 dB정도 이다. 이결과는 계산 결과보다 손실이 크게 나왔는데, 이것은 식각된 거울의 계면이 생각보다 거칠고, 또한 식각된 면이 수직이 아니라 각을 가지고 식각이 되어서 손실을 증가시키는 원인이 되었다. 그림 7은 전반사 거울 계면을 SiNx를 이용해서 300 nm 두께로 코팅을 하고 난후의 거울 개수에 따른 손실을 측정하였다. 측정된 손실은 한 개의 거울당 0.71 dB정도 이다. 이 결과는 계산 결과와 비

교했을 때 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 이러한 낮은 거울 손실은 최적화된 거울의 설계와 식각 단면을 깨끗하게 할 수 있는 RIE 공정 조건을 얻었기 때문에 가능한 것으로 본다. 1 dB보다 적은 거울 손실은 실제적인 마이크로 공진기 필터를 가능케 하리라 본다.

### 3. 2x2 다중모드 간섭 결합기

다중모드 간섭 결합기의 기본 원리는 self-imaging이다. 즉 다중모드 간섭 결합기로 입사된 광 모드가 도파로를 따라 진행하면서 주기적인 간격으로 단일이나 다중 이미지를 재생하는 것을 말한다.<sup>[10]</sup> 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. 다중모드 간섭은 일반적인 간섭과 제한적인 간섭이 있는데, 결합기의 길이를 가능한 줄여야 하기 때문에 본 연구에서는 제한적인 간섭을 적용하였다.<sup>[11]</sup> 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 식각해서 얻을 수 있다. 즉 짧은 결합기의 거리에서도 많은 다중모드를 만들어 쉽게 간섭을 일으키게 할 수 있다.<sup>[12]</sup> 또한 깊게 식각을 하면 식각 깊이에 따른 도파로의 민감도를 제거할 수 있다. 그러나 간섭기의 폭을 줄이게 되면 간섭기의 갭도 줄어들게 되기 때문에, 입력과 출력의 광 도파로 폭을 고려하여 간섭기의 폭을 설정해야 한다. 그림 8은 다중모드 간섭기의 폭에 따른 길이와 갭을 계산한 결과이다. 실제 공정에서 contact aligner를 이용하게 되면 최소 해상도가 1 μm가 넘어야 제작을 할 때 어려움이 없다. 따라서 간섭기의 갭이 1.552 μm가 되는 구간에서 간섭기의 폭과 길이를 구했다. 그림 9는 다중모드 간섭 결합기의 폭이 9 μm일 때, 결합기의 길이를 100 μm에서 124 μm까지 가변 시켰을 때의 광 출력을 FDTD 프로그램을 이용해서 계산한 결과이다. 다중모드 간섭기의 길이가 110 μm 영역에서 최적의 값을 나타내는 것을 볼 수 있다. 이때 출력 파워는 대략 45% 분배가 되고, 결합기의 손실은 0.46 dB이다. 그림 9의 내부는 최적화된 다중모드 간섭 결합기의 길이를 적용해 광 모드의 진행을 본 결과이다. 다중모드 간섭 결합기의 길이를 줄이기 위해서 결합기 주변을 깊게 식각을 하였고, 결과적으로 결합기 폭도 줄어들어 결합기의 입력과 출력의 도파로 폭을 1.5 μm 하였다. 그러나 깊게

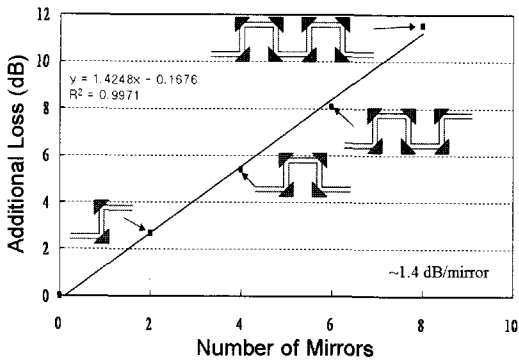


그림 6. 거울 계면이 공기중에 있을 때 거울 손실  
Fig. 6. Additional loss with air exposed interface on the mirror facet.

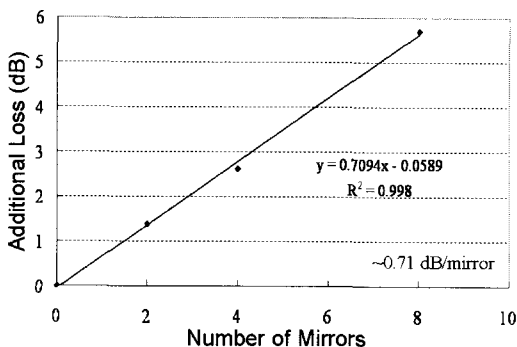


그림 7. 거울 계면이 SiNx로 코팅이 되었을 때 거울 손실  
Fig. 7. Additional loss with SiNx coated interface on the mirror facet.

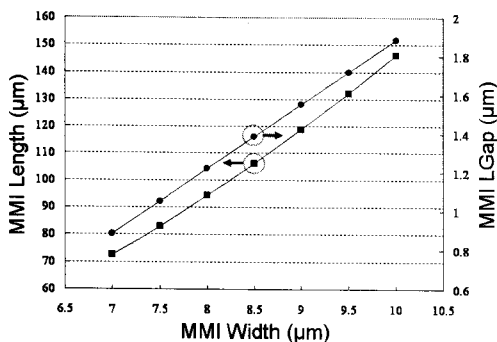


그림 8. 다중모드 간섭기의 폭에 따른 길이와 입출력 도파로 사이의 갭

Fig. 8. MMI length and gap for different MMI width.

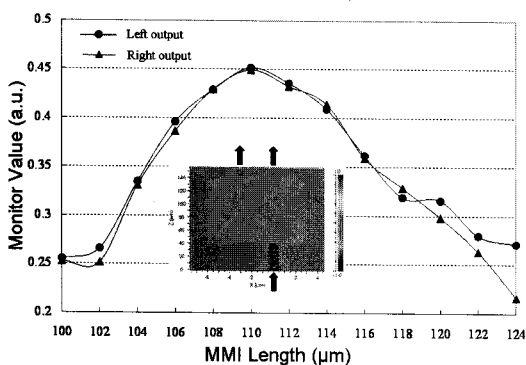


그림 9. 다중모드 간섭기의 길이에 따른 출력특성

Fig. 9. FDTD simulation results for different MMI lengths.

식각된 도파로는 정상적으로 식각된 일반적인 도파로가 있는 플랫폼에 연결하기가 어렵게 된다. 따라서 일반적인 도파로와 깊게 식각된 도파로를 연결해줄 수 있는 소자가 필요하게 된다. 두 개의 서로 다르게 식각된 도파로를 연결해주기 위해서 테이퍼를 이용하였다. 입력 도파로와 테이퍼 주변은 깊게 식각되었고, 폭은 1.5 μm이다. 출력 도파로 식각 깊이는 단일모드 구조가 되기 위해서 1.85 μm이고 폭은 3 μm이다. 테이퍼의 길이를 크게 하면 전파 손실은 줄어들지만, 전체 공진기의 길이가 늘어나게 되므로 최소의 손실을 갖으면서 테이퍼의 길이가 최소가 되어야 한다. FDTD로 계산했을 때, 테이퍼의 길이가 15 μm 이상이 되면 깊게 식각된 도파로에서 정상적으로 식각된 도파로로 파워의 전달이 대략 97% 이상이 된다는 것을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 테이퍼의 길이를 15 μm로 하였다.

### III. 실험 및 결과

그림 10은 다중모드 간섭 결합기 주변을 깊게 식각해

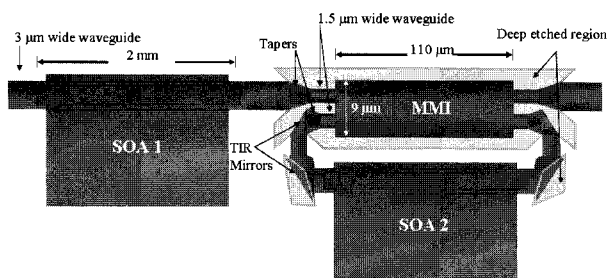


그림 10. 실험 제작에 사용된 직사각형 링 공진기 개념도

Fig. 10. Schematic diagram of a rectangular ring resonator used in the experiments.

서 만든 마이크로 공진기 필터의 개략적 도면이다. 필터의 구성은 깊게 식각된 다중모드 간섭 결합기, 4개의 테이퍼, 4개의 전반사 거울, 내부 광 증폭기로 되어 있다. 링 공진기 내부에서 링의 도파로 손실과 전반사 거울 손실을 극복하기 위해서 광 증폭기를 삽입하였다.<sup>[13]</sup> 삽입된 광 증폭기는 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 측정을 용이하게 하려고 집적을 하였다.

그림 11은 반도체 광 증폭기의 액티브 구조와 광 도파로와 다중모드 간섭 결합기 부분의 패시브 구조도이다. 여기서 다중모드 간섭 결합기의 주변은 4.5 μm까지 식각되고 링은 도파로의 폭이 1.5 μm이고 식각 깊이는 4.5 μm이다. 광 도파로의 가이드 부분은 InGaAsP 물질로 두께는 0.35 μm이고 1.4 μm에 해당하는 밴드갭을 가진다. 위와 아래의 클래딩 영역은 1.8 μm의 두께인 n과 p형의 InP로 되어있다. 광 증폭기의 액티브 영역은 0.1 μm 두께의 다중양자우물 층으로 구성되어 있었는데, 두께가 65 Å인 7개의 우물과 두께가 80 Å인 장벽으로 구성되어 있다.<sup>[14]</sup> 액티브와 패시브 도파로 폭은 3 μm이고 식각 깊이는 1.8 μm이다. 공정 순서는 한번의 웨이퍼의 재성장(regrowth)이 필요하다. 초기에 성장된 웨이퍼 구조는 그림 11의 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 식각해서 제거한다. 이렇게 제거를 한 다음에 1.8 μm의 두께의 p형 InP 층과 0.1 μm InGaAs 전극 컨택을 위한 층을 재성장 한다. 이 공정은 단지 한번의 재성장만 필요할 뿐 수직 결합기에서 요구하는 웨이퍼 본딩이 필요 없다. 이러한 공

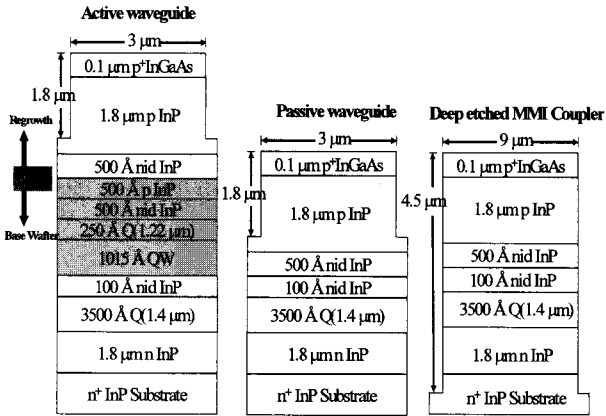


그림 11. 실험 제작에 사용된 액티브와 패시브 도파로 구조

Fig. 11. Cross sectional profile of the active, the passive and deep etched waveguide structure used in the experiments.

정은 전반사 거울을 만들기 위해서 필요한 깊게 식각을 하는 것을 제외하면 일반적인 광반도체 레이저 공정과 같다. 따라서 이 공정을 이용해서 만든 마이크로 링 공진기 필터는 파장 변환기나 파장 가변 레이저등과 쉽게 집적이 가능하다.

그림 12는 다중모드 간섭기의 결합 길이가 104 μm에서 122 μm로 변할 때, 링 공진기의 출력 특성을 보여준다. 이때 공진기 외부에 있는 광 증폭기에 전류를 140 mA로 인가하고, 공진기 내부의 광 증폭기에 전류를 40 mA로 인가하였다. 다중모드 간섭기 길이가 110 μm일 때 최적의 필터 특성을 얻을 수 있었고, 이것은 모의실험 결과와 잘 일치됨을 확인할 수 있었다. 이때 FSR는 대략 2 nm (244 GHz)이고 소광비는 13 dB이다. 그림 13은 공진기 외부에 있는 광 증폭기에 전류를 140 mA로 고정을 시키고, 공진기 내부의 광 증폭기의 전류를 0 mA에서 16 mA까지 변화를 주면서 인가를 하였다. 내부 광 증폭기에 전류가 인가되지 않았을 때는 필터 특성이 보이지 않았다. 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 거울에 의해서 손실을 겪고, 두 번째로 공진기 내부의 광 증폭기가 액티브 물질로 구성이 되어 있어 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 거울과 도파로에서 발생하는 손실을 극복할 만큼의 이득이 형성되어

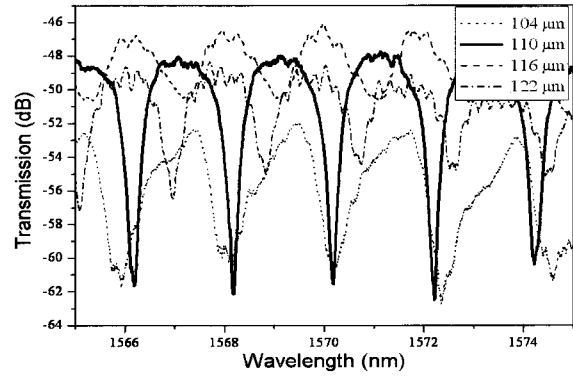


그림 12. 다중모드 간섭기의 길이에 따른 링 공진기의 필터 특성

Fig. 12. Transmission of the resonator at different lengths of an MMI.

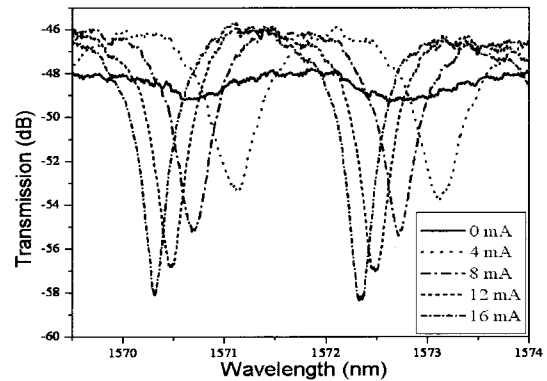


그림 13. 공진기 내부 증폭기의 전류 변화에 따른 공진 파장의 변화

Fig. 13. Variation of the resonances as the current of the SOA inside the resonator changes.

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.<sup>[15]</sup>

그림 14는 공진기 내부의 광 증폭기의 전류를 20 mA이상으로 크게 변화를 주었을 때의 공진파장의 변화를 본 것이다. 공진파장은 인가전류가 40 mA이하일 때는 짧은 파장으로 이동을 하지만, 40 mA 이상으로 인가를 하면은 큰 파장으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 광증폭기에서 발생하는 열 때문이다. 광

증폭기에 40 mA보다 큰 전류를 인가하게 되면 큰 파워를 소모하게 되는 데 이때 광증폭기는 열을 발생하게 되고 이것은 물질의 밴드갭을 줄어들게 만든다. 즉, 반도체 광 증폭기에 전류를 인가하면 초기에는 플라즈마 효과로 인해서 굴절률이 줄어들게 되지만 큰 전류를 인가하면 열 발생으로 인해서 궁극적으로 굴절률을 증가시키게 된다.<sup>[15]</sup> 또한 인가 전류가 20 mA에서 80 mA 사이에서는 소광비나 밴드 폭은 변하지 않는다. 이것은 광증폭기의 이득 포화현상 때문이다. 공진기 내부에서의 손실도 변하지 않고, 단지 광 증폭기 부분의 굴절률만이 열 발생으로 인해서 증가한다. 따라서 공진 파장만이 장파장 쪽으로 이동하고 다른 광 특성은 변하지 않는다. 그림 15는 공진기의 임계 결합 계수와 이때의 공진기 내의 임계손실이 얼마인지 알기 위해서, 그림

13에서 얻어진 결과에서 두 개의 이웃하는 공진 파장을 곡선 피팅에 의해 얻어진 각각의 값과 이것들의 평균값이다. 피팅에 의해서 얻어진 공진기 내부 손실은 7 dB이다. 광 증폭기에서 손실이 발생하지 않을 때까지 전류를 인가하면, 공진기 내부에서 발생하는 손실은 4개의 전반사 거울, 광 도파로, 테이퍼에 의한 것이다. 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 3.5 dB 정도로 변하지 않게 된다. 또한 곡선 피팅에 의해서 파워 결합력은 대략 42%를 얻을 수 있었고, 이때 공진기 내부 손실은 대략 2.4 dB이다.

IV. 결 론

본 연구에서는 광집적회로를 구성하기 위해서 InP 기판위에 아주 작은 다중모드 간섭기를 결합기로 사용하고, 마이크로 링 공진기 내부는 전반사 거울로 구성된 필터를 제작하여 그 특성을 측정 분석하였다. 전반사 거울이 삽입된 구조는 자동 정렬 공정을 통해서 구현 하였고, 측정된 전반사 거울의 손실은 한 개의 거울 당 0.71 dB를 얻을 수 있었다. 마이크로 링 공진기의 결합기로는 다중모드 간섭기를 이용하였고, 간섭기의 길이와 폭을 110  $\mu\text{m}$ 와 9  $\mu\text{m}$ 로 하여 빛이 광 도파로를 따라 진행할 때 링으로 결합되는 파워를 높였다. 깊게 식각된 다중모드 간섭기의 입출력 도파로에 길이가 15  $\mu\text{m}$ 인 테이퍼를 사용하였다. 링 공진기 내부의 광 도파로와 전반사 거울에서의 손실을 보상하기 위해서 링 공진기 내부에 반도체 광 증폭기를 집적하였다. 측정된 공진기의 FSR는 대략 2 nm (244 GHz)이고 소광비는 13 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 3.5 dB 정도로 변하지 않게 된다. 또한 곡선 피팅에 의해서 파워 결합력은 대략 42%를 얻을 수 있었고, 이때 공진기 내부 손실은 대략 2.4 dB이다.

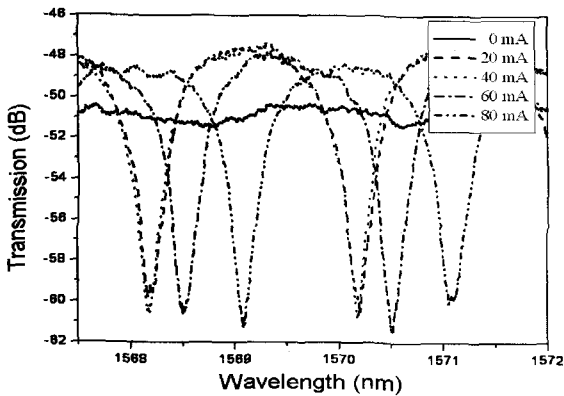


그림 14. 공진기 내부 증폭기의 높은 전류 변화에 따른 공진 파장의 변화  
 Fig. 14. Variation of the resonances as the current of the SOA inside the resonator changes.

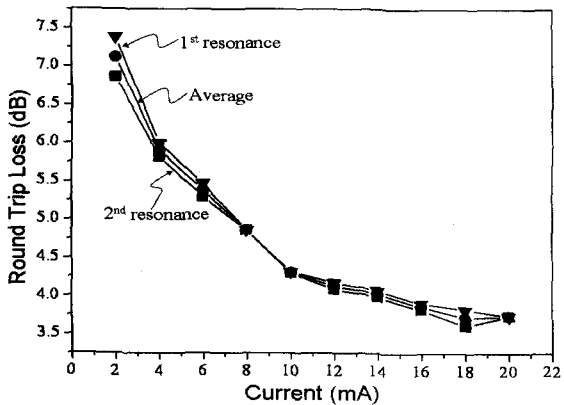


그림 15. 공진기 내부 증폭기의 전류 변화에 따른 공진기 내부 손실의 변화  
 Fig. 15. Variation of the round trip loss of the resonator for different SOA currents.

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] Ming Cai, Hunziker G., Vahala K., "Fiber-optic add-drop device based on a silica microsphere-whispering gallery mode system," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, pp. 686-687, June 1999.
- [3] Laine J.-P., Little B.E., Haus H.A., "Etch-eroded fiber coupler for whispering-gallery-mode excitation in high-Q silica microspheres," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, pp. 1429-1430, Nov. 1999.
- [4] 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.
- [5] W. Weiershausen and R. Zengerle, "Photonic highway switches based on ring resonators used as frequency-selective switches," *Appl. Opt.*, vol. 35, pp. 5967-5978, Oct. 1996.
- [6] 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.
- [7] S. J. Choi, K. Djordjev, P. D. Dapkus, W. Lin, G. Griffel, R. Menna, J. Connolly, "Microring resonators vertically coupled to buried heterostructure bus waveguides," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol.16, no.3, pp.828-30. March 2004.
- [8] 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, November 11- 14, 2002.
- [9] K. Oda, N. Takato, and H. Toba, "A wide-FSR waveguide double-ring resonator for optical FDM transmission systems," *J. Lightwave Technol.*, vol.9, pp. 728-736, June 1991.
- [10] O. Bryngdahl, "Image formation using self-imaging techniques," *J. Opt. Soc. Amer.*, vol. 63, no. 4, pp. 416-418, 1973.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] M. Fujita, R. Ushigome, and T. Baba, "Large spontaneous emission factor of 0.1 in a microdisk injection laser," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 13, pp. 403-405, May 2001.

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 운 경**(정회원)  
 2002년 중앙대학교 전자공학과 (공학사).  
 2004년 중앙대학교 전자 전기공학부 (공학석사).  
 2004년 3월~현재 중앙대학교 전자전기공학부 박사과정 재학중.

<주관심분야: 광스위칭 시스템 및 소자, Optical Interconnection>



**최 영 완**(정회원)  
 1985년 서강대학교 전자공학과 (공학사).  
 1987년 버팔로 뉴욕주립대(SUNY at Buffalo), 전기 및 컴퓨터공학과(공학석사).  
 1992년 버팔로 뉴욕주립대(SUNY at Buffalo), 전기 및 컴퓨터공학과(공학박사).

1992년~1995년 한국전자통신연구원(ETRI), 선임연구원.  
 1995년~현재 중앙대학교 전자공학과 교수.  
 <주관심분야: Microwave-Photonics, Optical interconnection, 광스위칭 시스템 및 소자>



**이 중 창**(정회원)  
 1983년 서울대학교 전자공학과 (공학사).  
 1985년 KAIST 전기 및 전자공학과(공학석사).  
 1994년 UCSB, 전기 및 컴퓨터공학과(공학박사).

1985년~1989년 KIST 응용광학실 연구원.  
 1994년~현재 홍익대학교 전자전기공학부 교수.  
 <주관심분야: Photonic Integrated Circuits, Quantum Optoelectronics, Microwave- Photonics>