

UCSB Optical Microwave Integrated Circuits and Devices Research Lab/
광운대학교 광통신 연구실

마이크로 링 공진기 광집적 소자 기술

정영철, 김수현

광운대학교 전자통신공학과 Email : ychung@daisy.kw.ac.kr

Nadir Dagli, 김두근

Department of Electrical and Computer Engineering University of California, Santa Barbara

Email : dagli@ece.ucsb.edu

1

머리글

마이크로 링 공진기는 크기가 매우 작고, 다양한 광신호 처리 기능을 보유하고 있기 때문에 대규모 광집적회로의 기본 소자로서 유망하다. 마이크로 링 공진기를 기본 구성 요소로 하는 실제 소자들이 다양한 형태로 구현된 바 있는데, 예를 들자면 GaAs 마이크로 링 레이저, 채널 드롭 필터, WDM 분파기, ON-OFF 스위치, 분산 보상기 등이 있다. 이와 같은 소자들에 사용되는 마이크로 링 공진기의 반경은 4에서 50 마이크로 정도의 분포를 보이고 있다. 이와 같은 작은 면적으로 인하여, 제곱 센티 미터 당 10개 정도의 광 소자를 집적할 수 있다. 한편으로는 마이크로 링 공진기를 기본 단위 소자로 하는 낮은 스위칭 파워 광 메모리 셀이 구현된 바도 있다. 최근의 활발한 마이크로 링 공진기 소자에 대한 연구에도 불구하고, 대규모 집적화에 적절한 마이크로 링 공진기 소자를 상용화시키기 위해서는 보다 많은 연구가 필요하다. 본 글에서는 최근의 관련 연구 동향을 소개하고, 최근 우리 연구팀(UCSB의 Nadir Dagli 교수 연구실, 광운대학교 정영철 교수 연구실)에서 수행하고 있는 마이크로 링 공진기 구조 설계 및 제작 결과 등에 대해서 소개하고자 한다.

2

마이크로 링 공진기 연구 동향

단일 리소 공정과 식각으로 다양한 파장특성을 가지는 링 공진기는 여러 연구 그룹에서 활발히 연구되고 있다. 링 공진기의 이론적인 해석으로부터 시작해서 링 공진기의 쌍안정 특성까지 다양한 구조의 링 공진기가 연구 개발되고 있다. 이번 장은 여러 연구 그룹에서 현재 진행 중인 링 공진기의 구조 및 연구 결과들을 간략히 정리하였다.

링 공진기에 대해서 활발히 연구하고 있는 그룹중 하나인 미국의 메릴랜드 대학의 Ho 교수팀은 화합물 반도체 또는 폴리머 재료를 기반으로 다양한 기능의 링 공진기에 대해서 연구하고 있다. 이 연구팀에서 연구하고 있는 대표적인 연구 분야는 파장가변 링 공진기 구조의 노치 필터, 링 공진기 구조의 전광 스위치, 링 공진기로 구성된 채널 드롭 필터, 가감 필터, 링 공진기 구조의 논리 게이트 등이 있다. 이들 소자의 구조는 대부분 Race-Track 형태의 단일 링 공진기와 한개 혹은 두개의 직선 도파로로 구성

된다. 그림 1은 최근에 발표된 링 공진기 구조의 가감필터의 SEM 사진이다. 링 공진기의 곡선도와 손실을 줄이기 위해서 깊이 식각된 도파로를 사용하였다. GaAs 마이크로 링 공진기의 경우 Free Spectral Range(FSR)은 18nm, Q-factor는 1200 정도의 결과를 보였으며, InP를 사용한 경우 도파로 간의 수직 결합을 통해 24nm의 FSR과 6200의 Q-factor 값을 가지는 파장 채널 가감필터를 구현하였다. 또한 웨이퍼 접합 기술을 이용하여 수직으로 광파를 결합하는 링 공진기에 대한 연구와 Mach-Zehnder 간섭계에 링 공진기를 집적하여 평탄한 주파수 응답을 가지는 파장 Mux/Demux도 제작하였다⁽¹⁻⁴⁾.

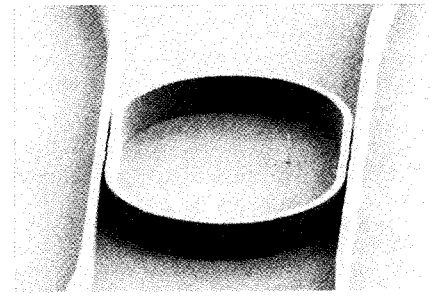


그림 1. Race-Track 형태의 링 공진기 파장 채널 가감 필터

캘리포니아 공과대학의 Yariv 교수팀은 그림 2에 보인 바와 같이 링 공진기로 구성된 결합 공진 광 도파로(coupled-resonator optical waveguide: CROW)의 이론적인 해석 및 CROW와 마하-젠더 간섭계로 구성된 변조기에 대해서 현재 연구가 진행 중에 있다. 링 공진기로 구성된 CROW는 그림에서 보는 바와 같이 여러 개의 링 공진기의 결합으로 구성된 도파로이다. 독특한 구조의 도파로는 일반적인 직선에 비해서 진행하는 광파의 군속도를 상당히 작게 할 수 있기 때문에 비선형 주파수 변환의 효율을 크게 증가시킬 수 있으며 극단적인 경우에는 'frozen pulse'를 생성할 수 있다⁽⁵⁻⁸⁾.

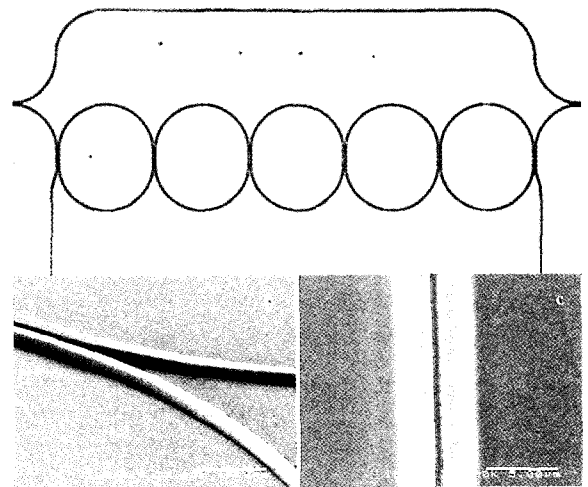


그림 2. 결합 공진 광 도파로로 구성된 마하-젠더 간섭계

일본의 Yasuo Kokubun 교수팀은 수직하는 두개의 직선 도파로와 링 도파로로 형성되는 파장 채널 가감 필터에 대한 연구를 중점적으로 진행하고 있다. 특히 이 연구팀은 제작이 용이 하고 집적도와 도파로 사이의 광파의 결합을 향상시키기 위해서 도파로 사이의 광파의 결합이 수평(lateral coupling)이 아닌 수직(vertical coupling)으로 결합되는 Vertically coupled microring resonator(VCMRR) 구조를 이용한 링 공진기에 대해서 연구하고 있다. 도파로 사이의 광파가 서로 결합하기 위해서는 도파로의 간격이 서브 마이크로 이하가 되어야 하는데 직선 도파로와 링 공진기를 서로 다른 레이어에 구성하는 VCMRR 구조로 제작하게 되면 보통의 포토 리소 공정으로 충분히 제작할 수 있으며 보다 링 공진기의 집적도를 향상시킬 수 있다. 이러한 VCMRR 구조로 8채널 가감 필터 배열에 대한 연구 결과를 발표 하였으며, 이러한 연구 결과를 토대로 링 공진기를 이용한 VLSI Photonics circuits의 개념으로 확대하는 연구를 수행하고 있다. 최근에는 그림 3과 같이 수직하는 직선 도파로도 서로 다른 레이어에 구성하여 도파로가 직교하는 부분의 산란 손실을 크게 줄일 수 있는 링 공진기 가감 필터를 제작하여 보다 집적도와 성능을 향상시킨 연구결과를 발표하였다⁽⁹⁻¹¹⁾.

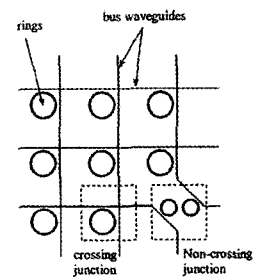
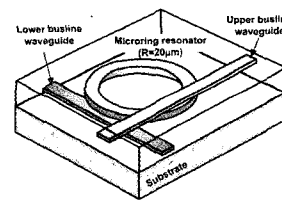


그림 3. 수직으로 광 결합이 이루어지는 마이크로 링 공진기 구조의 파장 채널 가감필터 및 십자 그리드 어레이의 응용

마이크로 링 공진기를 이용하여 파장가변 레이저 다이오드를 제작하는 연구도 활발히 진행되고 있다. 미국의 Santa Cruz 대학의 Ali Shakouri 교수팀은 그림 4와 같이 두개의 Race-Track형 링 공진기와 세 개의 직선 도파로와 반도체 광 증폭기가 집적된 구조(Double-ring resonator coupled lasers: DR-RCLs)로 파장가변 레이저 다이오드를 제작하였다. 링 공진기는 광파의 결합을 향상시키기 위해서 Race-track 형태로 제작하였으며 이때 결합되는 도파로의 길이는 500 μm 이었고, 도파로 사이의 간격은 1 μm 로 하였다. 이 레이저 다이오드는 두 링 도파로의 길이를 서로 다르게 하여 두 링 공진기의 전체 FSR을 크게 하여 특정 파장에서 단일 모드로 발진하게 한다. 이러한 DR-RCLs의

장점은 버니어 효과(Vernier effect)에 의해서 높은 파장가변 증가 요소(Tuning enhancement factor)를 가질 수 있다는 점이다. 제작결과 부 모드 억제율은 35dB 이상의 단일모드로 발진하였고 이때 출력 파워는 0.5mW 정도이었다. 수동 링 공진기의 굴절률을 변화시켜 발진 파장을 가변시켰으며 이때 파장가변 범위는 약 6nm로 작은 편이다. 독일의 Alfred Forchel 교수팀은 두개의 링 도파로와 한 개의 직선 도파로로 구성되고, 직선 도파로로 전체가 이득영역으로 구성된 파장가변 레이저 다이오드를 제안하였다. 직선 도파로에 전류를 인가시켜 발진시키고, 파장가변은 인가되는 전류의 양에 따라 가변된다. 제작 결과 출력 파워는 30mW이상으로 발진하고 그때의 부모드 억제율이 40dB 이상의 단일 모드로 발진하였다. 파장가변은 이득영역에 인가되는 전류가 100mA에서 500mA로 변화 될 때 1539nm에서 1592nm로 약 60nm 정도 변화하였다. 이때 발진 파장의 변화는 15nm간격으로 불연속적으로 파장가변이 된다^[12,13].

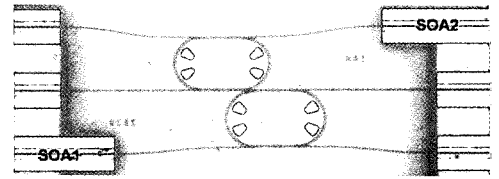


그림 4. 링 공진기로 구성된 파장가변 레이저 다이오드

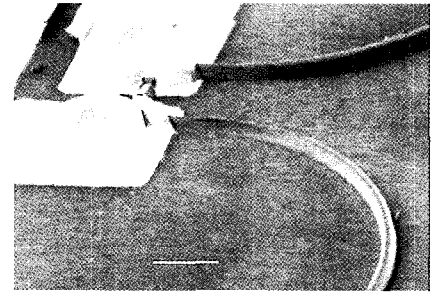


그림 5. 링 공진기를 이용한 광 메모리 셀

이외에도 버스 도파로를 통하여 에너지가 교환되는 링 공진기의 쌍안정 특성을 이용한 메모리 구조에 대해서도 네델란드의 아인트호벤 대학 연구팀에 의해 연구되고 있다. 그림 5와 같이 두개의 링 공진기와 링 공진기를 연결해 주는 한 개의 버스 도파로로 구성되어 있으며, 한 셀의 크기가 $700\mu m^2$ 정도로 매우 작다. 링 도파로는 이득 영역으로 구성되어 있고 버스 도파로는 수동 도파로로 구성된다. 전류를 인가시킨 상태에서 버스 도파로를 통해 짧은 광 펄스를 인가시키면 링 공진기에 의해서 광파가 증폭되기 때문에 반대편 포트에서의 출력은 증가된다. 광 펄스를 인가시킨 후에도 링 공진기에 의해서 광파가 증폭되면서 공진되기 때문에 포트에서의 출력 값은 계속 유지된다. 이때 포트를 바꾸어서 광파를 인가시키면 반대편 포트의 출력이 증가된다. 링 공진기 상에서 서로 반대로 진행되는 광파는 서로 결합하지 않기 때문에 한 쪽 포트의 출력이 커지게 되면 다른쪽 포트의 출력이 작아지게 되므로, 각 포트에 광 펄스를 적절히 인가 시켜주게 되면 원하는 포트의 출력을 on과 off 상태로 유지할 수 있다. 제작된 링 공진기 구조의 광 메모리 셀의 스위칭 시간은 20ps 정도로 고속의 동작이 가능하고, 메모리 셀을 구동하는데 필요한 에너지는 5.5pJ로 매우 작다^[14].

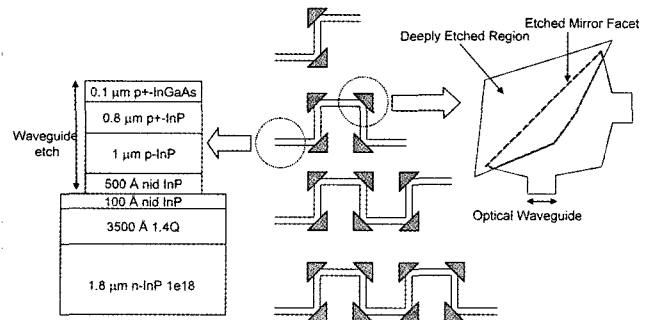


그림 6. 도파구조 제작 플랫폼으로 사용되는 에피구조 및 TIR 거울의 평면도

3 본 연구팀의 연구 개발 현황

3.1. 전반사 거울 구조를 포함하는 마이크로 링 공진기 필터의 각 구성요소 설계

작은 크기를 가지는 공진기는 링 도파로에 전반사(TIR : Total Internal Reflection) 거울을 삽입함으로써 구현될 수 있다. 그러나 InGaAsP 물질에서 반사 손실이 작은 전반사 거울을 실현하기 위해서는 구조적인 최적화와 더불어 자기 정렬 공정이 개발되어야 한다. 그림 6은 본 연구팀에서 사용하는 광도파로의 구조와 전반사 거울의 평면도를 나타낸다. 오른쪽에 보인 전반사 거울 영역의 확대된 그림은 자기 정렬 공정에 사용되는 광도파로 마스크와 거울면 근처의 깊은 식각되는 영역을 나타내는 마스크

의 개요도이다.

반도체에서 전반사 거울은 깊게 식각해서 구현하며, 이때 반도체와 공기면의 전반사 임계각은 16° 이다. 전반사가 발생할 때는 Goos-Hansen 효과가 발생하며, 그림 7(a)에서 나타나는 것처럼 굴절률이 높은 물질에서 전반사 되는 광파는 실제로 존재하는 물리적인 계면보다 조금 바깥쪽에 있는 가상적인 거울로부터 반사한 것처럼 나타난다. 따라서 실제 전반사 거울을 디자인할 때 물리적인 계면을 약간 안쪽으로 위치를 잡아야 한다. 전반사 거울 계면이 안쪽으로 $0.1\mu\text{m}$ 정도 들어갔을 때 최소의 전반사 거울 손실을 갖는다는 사실이 잘 알려져 있다.

전반사 거울을 이용한 링 공진기 필터를 만들기 위해서는 거울 면에서 손실을 얼마나 줄이는가에 따라서 필터의 성능이 많이 좌우되게 된다. 그림 8은 전반사 거울의 제작 공정이다. (a) 공정에서는 PECVD를 이용해서 웨이퍼에 SiNx를 120nm를 증착한다. 이렇게 증착된 웨이퍼를 가지고 (b)의 리소그래피 공정을 이용해서 패턴을 형성하였다. 패턴이 형성된 웨이퍼를 (c) 공정의 CF₄ 플라즈마를 이용해서 SiNx를 에칭하고, 포토리지스터를 제거하면 SiNx로만 패턴이 형성이 된다. SiNx로만 패턴이 형성된 웨이퍼를 (d) 공정의 RIE 장비를 이용해서 $1.85\mu\text{m}$ 까지 식각하면 광도파로와 전반사 거울을 형성할 수 있다. 첫 번째 식각의 목적은 광도파로가 싱글모드가 되도록 식각하는 것이기 때문에 미러 부분이 충분히 식각되지 않은 상태이다. 그러나 미러 면에서 광 모드를 충분히 커버하기 위해서는 거울 면이 포함된 영역만을 깊게 식각해야 한다. 이를 위하여 (e) 공정과 (f) 공정의 lift-off 방법으로 리소그래피 공정을 수행한다. E-beam 증착 장비를 이용해서 SiO₂를 증착한 후, lift-off 방법으로 거울 면이 포함된 깊은 식각 영역에 SiO₂를 제거한다. 이렇게 형성된 패턴을 (g) 공정의 RIE 장비를 이용해서 거울면이 포함된 영역을 $4.5\mu\text{m}$ 깊이까지 식각한다. 마지막으로 (h) 공정에서처럼 HF를 이용해서 SiNx와 SiO₂를 완전히 제거한다. 측정된 전반사 거울의 손실은 약 0.7dB 정도이다.

그림 9는 깊게 에칭이 된 테이퍼와 전반사 거울을 연결한 구조이다. 이때 테이퍼의 길이는 최적화된 $15\mu\text{m}$ 를 사용했고, 출력력은 식각 깊이가 $1.85\mu\text{m}$ 인 통상적인 도파로를 연결하였다. 그림 10의 FDTD 계산 결과에 따르면, 최적의 거울 offset 위치는 $0.2\mu\text{m}$ 정도이다.

그림 11은 깊게 식각된 다중모드 간섭 결합기의 구조를 나타낸다. 그림 12는 다중 모드 간섭 결합기의 길이가 $100\mu\text{m}$ 에서 $124\mu\text{m}$ 까지 변할 때의 광 출력을 나타낸다. 다중 모드 간섭기의 길이가 $110\mu\text{m}$ 일 때 최적의 값을 나타내는 것을 볼 수 있다. 이때 출력 파워는 대략 45% 분배되고, 결합기의 손실은 0.46dB이다.

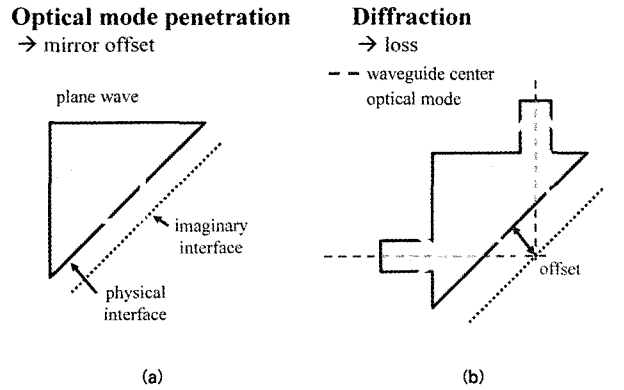


그림 7. TIR 거울의 가상 반사면의 이동

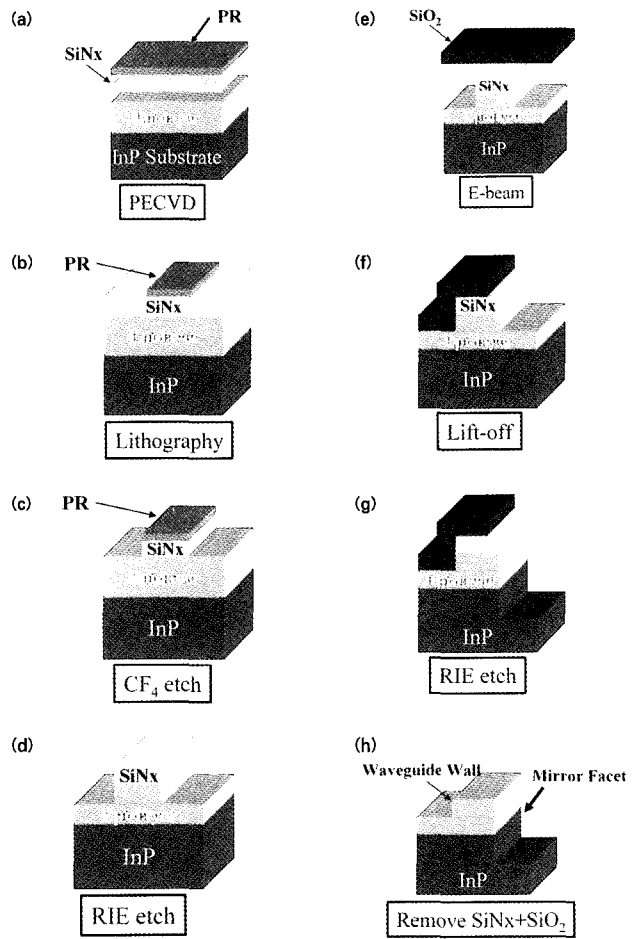


그림 8. TIR 거울을 제작하기 위한 자동 정렬 공정

3.2 깊게 식각된 MMI 결합기와 TIR 거울을 이용한 링공진기 필터

그림 13은 다중모드 간섭 결합기 주변을 깊게 에칭을 해서 만든 마이크로 공진기 필터의 개략적 도면이다. 필터의 구성은 깊게 식각된 다중 모드 간섭 결합기, 4개의 테이퍼, 4개의 전반사 미러, 내부 광 증폭기로 되어 있다. 링 공진기는 도파로와 전반사 거울 만을 사용하여 구성하였다. 이를 통하여 링의 전체 둘레를 334 μm 로 줄였다. 여기서 다중모드 간섭 결합기의 길이와 폭은 113 μm 와 9 μm 로 하였다. 다중 모드 간섭 결합기에서 입출력 도파로의 폭은 1.5 μm 이고 4.5 μm 정도 식각하였다. 이러한 입출력 도파로를 폭이 3 μm 인 정상적인 도파로에 연결하기 위해서 15 μm 길이의 테이퍼를 사용하여 연결하였다. 링 공진기 내부에서 도파로와 전반사 미러 손실을 극복하기 위해서 길이가 123 μm 인 광 증폭기를 삽입하였고, 필터 소자와 집적이 된 왼쪽 부분의 길이가 2mm인 광 증폭기는 소자를 측정하기 위해서 LED로 동작하는 광원이다. 그림 14에는 반도체 광 증폭기의 에피 및 식각된 구조와, 광 도파로와 다중 모드 간섭 결합기 부분의 에피 및 식각된 구조를 보였다.

그림 15는 실험에 사용된 마스크 도면이고, 왼쪽 부분은 링과 미러 영역을 확대한 마스크 도면이다. 오른쪽의 패드 부분에 있는 사진은 실제로 제작된 마이크로 공진기 소자이다. 그림 16에는 제작된 마이크로 공진기의 다중모드 간섭 결합기의 입출력 도파로와 연결된 테이퍼와 전반사 미러의 SEM 사진을 나타내었다. 그림에서 오른쪽은 왼쪽 그림을 대략 2배정도 확대해서 보여 주는데, 식각된 테이퍼 둘레와 전반사 거울의 계면은 상당히 매끄러움을 알 수 있다. 그림 17에는 공진기 외부에 있는 광 증폭기에 전류를 100mA에서 140mA까지 20mA단위로 인가하고, 공진기 내부의 광 증폭기에 전류를 40mA를 인가했을 때, 마이크로 공진기 필터의 특성을 나타낸다. 그림 18은 공진기 외부에 있는 광 증폭기에 전류를 140mA를 인가하고, 공진기 내부의 광 증폭기에 전류를 40mA를 인

가했을 때, 1567.5nm에서 1572.3nm까지 마이크로 공진기 필터의 특성을 나타낸다. 이때 FSR는 대략 2nm(244GHz), 소광비는 14dB이고 FWHM는 0.3nm이다. 여기에서 Finesse는 6이고 Q 값은 4900이다.

그림 19는 공진기 외부에 있는 광 증폭기에 전류를 140mA로 고정시키고, 공진기 내부의 광 증폭기의 전류를 0mA에서 20mA까지 변화를 주면서 인가한 경우의 측정 결과이다. 내부 광 증폭기에 전류가 인가되지 않았을 때는 필

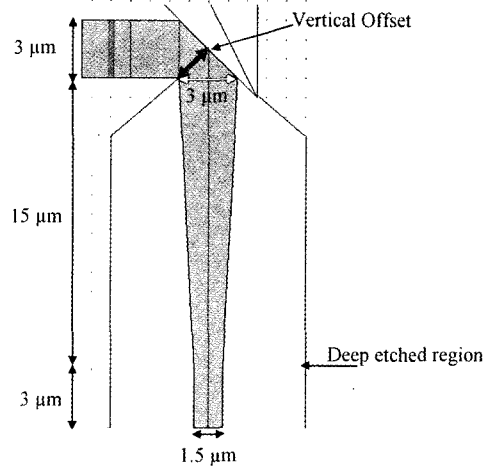


그림 9. Taper and TIR mirror structure with input and output waveguide

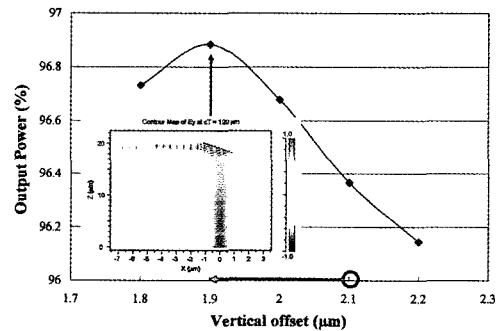


그림 10. FDTD simulation results for TIR mirror offset

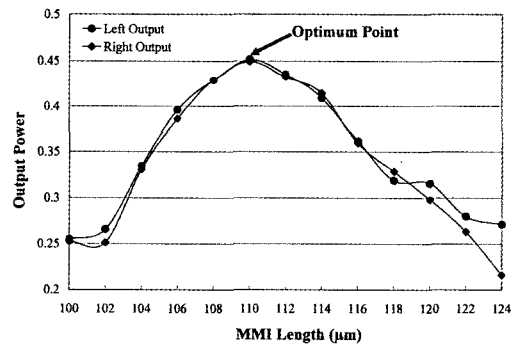


그림 12. MMI 길이에 따른 출력 FDTD simulation results of MMI from 100 μm to 124 μm

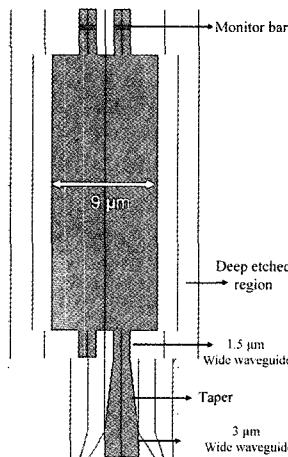


그림 11. 깊게 식각된 MMI 구조

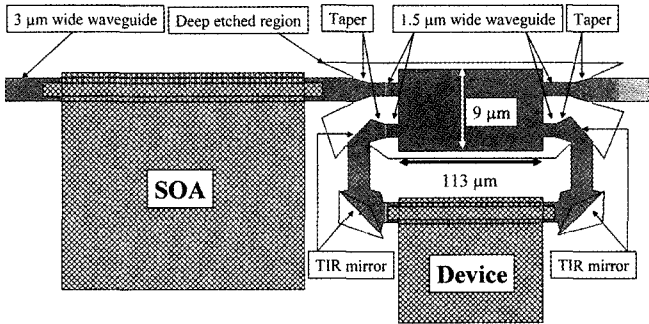


그림 13. MMI 결합기, TIR 거울, SOA로 구성되는 마이크로 링 공진기의 개요도

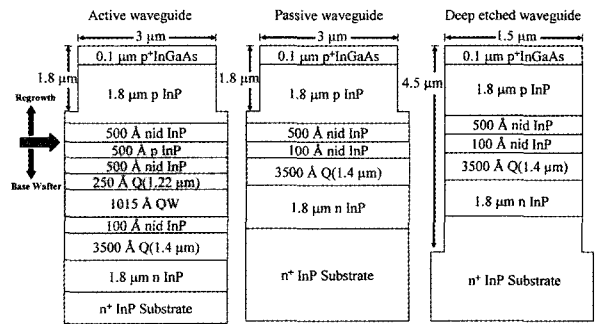


그림 14. 증폭영역, 도파로 영역, 깊이 식각된 영역의 에피층 및 식각 형태

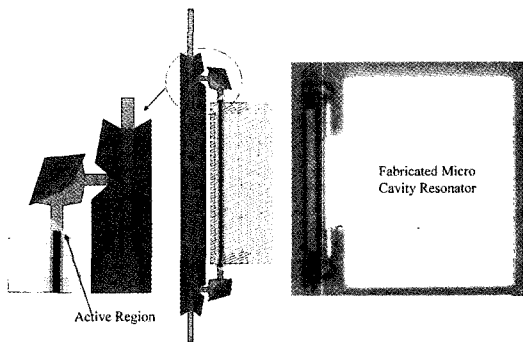


그림 15. MMI 결합기, TIR 거울, SOA로 구성된 마이크로 링 공진기의 마스크 레이아웃 및 제작된 소자의 평면 사진

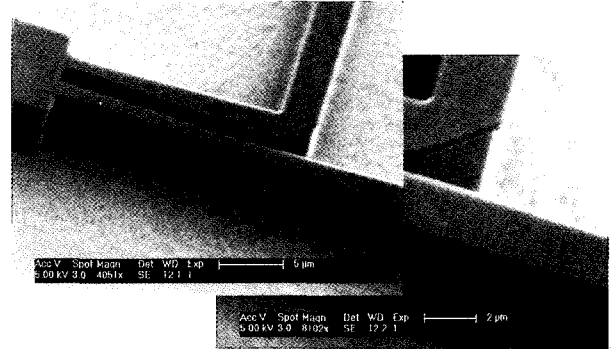


그림 16. MMI 결합기, TIR 거울, SOA로 구성된 마이크로 링 공진기에서 TIR 거울과 MMI 결합기의 SEM 사진

터 특성이 보이지 않다가 전류가 증가함에 따라서 필터 특성이 보이면서 공진 파장은 단파장으로 이동하게 된다. 플라즈마 효과 때문에 전류인가로 인한 캐리어들의 주입은 굴절률의 감소를 나타내는데, 전류를 2mA에서 14mA까지 증가시켰을 때 그룹 굴절률은 3.778에서 3.752로 줄어들었다. 광 도파로와 테이퍼의 손실을 1.6dB라고 가정을 하면, 전반사 미러에 의한 손실은 대략 4.4dB 정도이다. 큰 미러의 손실이 미러당 대략 0.7dB이므로 작은 미러의 손실은 1.5dB이다. 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 3.5dB 정도로 변하지 않게 된다. 즉 광 증폭

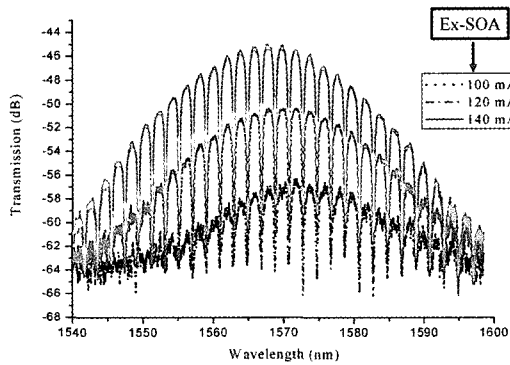


그림 17. 마이크로 링 공진기 필터의 파장 특성. SOA에는 100에서 140mA의 전류를 인가하였고, 공진기 내부의 증폭기에는 40mA를 인가하였다.

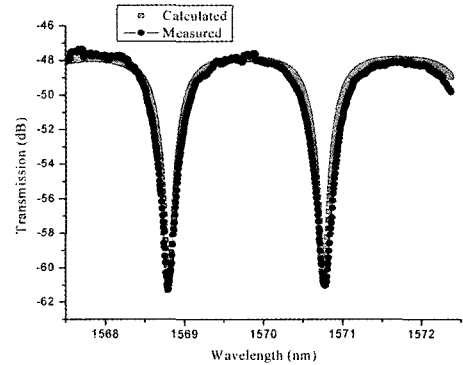
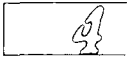


그림 18. MMI 결합기가 포함된 마이크로 링 공진기의 대역 제거 필터 특성. SOA에는 140mA의 전류를 인가하였고, 공진기 내부의 증폭기에는 40mA를 인가하였다.

기의 포화 이득은 대략 2.5dB이다. 또한 곡선 피팅에 의해서 MMI 결합기의 결합 비율은 대략 42%임을 알 수 있었고, 이때 공진기 내부 손실은 대략 2.4dB이다^[15, 16].



맺음말

고도로 집적화된 광집적회로를 실현하기 위한 단위 소자로서 마이크로 링 공진기에 대한 연구가 널리 수행되고 있으며, 다양한 연구 결과들이 보고되고 있다. 파장 채널 가감필터, 전광(All Optical) 스위치, 결합 링 공진기 도파로, 교차 도파로와 결합된 링 공진기, 링 공진기를 이용한 파장 가변 레이저, 링 공진기 광 메모리 등에 대한 연구 결과들이 보고되었다. 많은 연구 그룹들의 노력에 의하여, 상당한 진전이 있었음에도 불구하고, 마이크로 링 공진기를 고 집적 광 회로에 통상적으로 적용하기에는 추가적인 연구개발이 심도 있게 진행되어야 한다.

마이크로 링 공진기를 보다 작게 구현하기 위하여 본 연구팀에서는 전반사 거울을 이용한 링 도파로, 깊게 식각된 MMI 결합기로 이루어진 링 공진기를 단위 소자로 개발하고 있다. 광도파 재료로는 InP 기반의 광대역 파장 가변 레이저 광집적회로의 플랫폼으로 많이 사용되는 Offset Quantum Well 구조를 사용함으로써, 향후 레이저, 파장변환기, 광변조기 등이 다양한 소자와의 집적을 용이하게 하였다. 전반사 거울을 구현하기 위해서 자동 정렬 공정을 개발하였고, 거울 하나 당 0.7dB 정도의 손실이 측정되었다. 깊이 식각된 MMI 구조를 설계함으로써, 110나노미터 정도의 다중모드 도파 구조에서 3dB 광 결합기를 구현하였다. 링 도파로의 각종 손실을 보상하기 위하여, 광증폭기를 링 내부에 집적하였다. 링 도파 구조 내의 증폭기를 펌핑하여 이득을 적절히 조절함으로써 링 공진기로의 커플링을 최대가 되게 하는 임계 결합(Critical Coupling) 조건을 조성할 수 있음을 확인하였다.

본 연구팀의 향후 과제로서는 마이크로 링 공진기 필터를 파장가변 레이저 다이오드 등과 집적한 기능성 광 집적 소자를 실현하여, 광통신 및 신호처리 소자로서의 효율성을 증대시키는 것이다. 또한 마이크로 링 공진기의 크기를 더욱 소형화할 수 있는 방안을 도출함으로써, 집적도를 향상 시키는 노력이 필요하다.

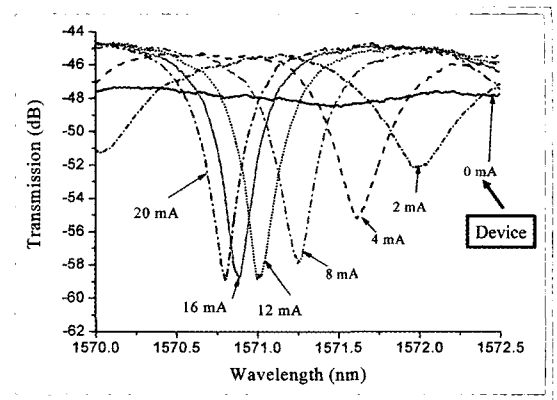


그림 19. SOA에는 140mA의 전류를 인가하고, 링 공진기 내부의 전류를 0mA에서 20mA로 변화할 때의 파장 투과 특성의 변화



참고문헌

- (1) T. A. Ibrahim, W. Cao, Y. Kim, J. Li, J. Goldbar, P.-T. Ho and C. H. Lee, "All-optical switching in a laterally coupled microring resonator by carrier injection", *Photonics Technology Letters*, Vol. 15, No. 1, pp. 36-38, 2003
- (2) R. Grover, T. A. Ibrahim, S. Kanakaraju, L. Lucas, L. C. Calhoun, and P.-T. Ho, "A tunable GaInAsP-InP optical microring notch filter", *Photonics Technology Letters*, Vol. 16, No. 2, pp. 467-469, 2004
- (3) V. Van, T. A. Ibrahim, K. Ritter, P.P. Absil, F. G. Johnson, R. Grover, J. Goldbar, and P.-T. Ho, "All-optical nonlinear switching in GaAs-AlGaAs microring resonator", *Photonics Technology Letters*, Vol. 14, No. 1, pp. 74-76, 2002
- (4) P. P. Absil, J. V. Hryniewicz, B. E. Little, F. G. Johnson, K. J. Ritter, and P.-T. Ho, "Vertically coupled microring resonators using polymer wafer bonding", Vol. 13, No. 1, pp. 49-51, 2001
- (5) G. T. Paloczi, Y. Huang, and A. Yariv, "Polymeric Mach-Zehnder interferometer using serially coupled microring resonators", *Optics Express*, Vol. 11, No. 21, pp. 2666-2671, 2003
- (6) J. K. S. Poon, J. Scheuer, S. Mookherjee, G. T. Paloczi, Y. Huang, and A. Yariv, "Matrix analysis of microring

- coupled-resonator optical waveguides”, *Optical Express*, Vol. 12, No. 1. pp. 90-103, 2003
- [7] J. K. S. Poon, J. Scheuer, A. Yariv, “Wavelength-selective reflector based on a circular array of coupled microring resonators”, *Photonics Technology Letters*, Vol. 16, No. 5, pp. 1331-1333, 2004
- [8] J. K. S. Poon, Y. Huang, G. T. Paloczi, A. Yariv, “Soft lithography replica molding of critically coupled polymer microring resonators”, *Photonics Technology Letters*, Vol. 16, No. 11, pp. 2496-2498 2004.
- [9] Y. Hatakeyama, T. Hanai, S. Suzuki, and Y. Kokubun, “Loss-less multilevel crossing of busline waveguide in vertically coupled microring resonator filter”, *Photonics Technology Letters*, Vol. 16, No. 2, pp. 473 -474, 2004
- [10] B. E. Little, S. T. Chu, W. Pan, and Y. Kokubun, “Microring Resonator Array for VLSI Photonics”, *Photonics Technology Letters*, Vol. 12, No. 3, pp.323-325, 2000.
- [11] 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 resonator over a cross grid”, Vol. 11, No. 6, pp.691-693, 1999
- [12] D. G. Rabus, Z. Bian and A. Shakouri, “A GaInAsP-InP double-ring resonator coupled laser”, *Photonics Technology Letters*, Vol. 17, No. 9, pp.1770-1772, 2005
- [13] L. Bach, J. P. Reithmaier, A. Forchel, J.L. Gentner, and L. Goldstein, “Wavelength stabilized single-mode lasers by coupled micro-square resonators”, *Photonics Technology Letters*, Vol. 15, No. 3, pp.377-379, 2003
- [14] M. T. Hill, H. J. S. Dorren, T. Vries, X. J. M. Leijtens, J. H. Besten, B. Smallbrugge, Y. Oei, H. Binsma, G. Khoe and M. K. Smit, “A fast low-power optical memory based on coupled micro-ring lasers”, *Nature*, Vol. 432, No. 11, pp.206-209, 2004
- [15] D. G. Kim, J. H. Shin, C. Ozturk, J. C. Yi, Y. Chung, N. Dagli, “Novel Ring Cavity Resonators Incorporating Total Internal Reflection Mirrors and Semiconductor Optical Amplifiers”, *CLEO/QELS 2005, CMP4*, May 23, 2005.
- [16] D. G. Kim, J. H. Shin, C. Ozturk, J. C. Yi, Y. Chung, N. Dagli, “Total Internal Reflection Mirror based InGaAsP Ring Resonators Integrated with Optical Amplifiers”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 17, No. 9, September(2005).