

광대역 파장가변 이중 링 공진기 Add/Drop 필터

이동현 · 이태형 · 박준오 · 김수현 · 정영철[†]

광운대학교 전자통신공학과

☎ 139-701 서울특별시 노원구 월계동 447-1 참빛관 712

(2007년 6월 5일 받음, 2007년 6월 16일 수정본 받음)

본 논문에서는 굴절률 차이가 큰 폴리머 광 도파로를 이용하여 광대역 파장가변이 가능한 이중 링 공진기 Add/Drop 필터를 제작하였다. Add/Drop 필터의 제작시 공정 오차에 둔감한 특성을 갖도록 광 결합기를 설계하였다. 코어와 클래딩의 굴절률은 1550 nm 파장 대역에서 각각 1.51, 1.378로 약 100 μm 정도의 곡률 반경을 가지는 곡선 도파로를 수용할 수 있다. 두 개의 링이 동시에 공진하는 파장 대역에서 Drop 특성은 이웃하는 피크 보다 약 2.9 dB 이상 높은 특성을 보였다. 이 필터는 반사형 반도체 광증폭기 등과의 하이브리드 집적을 통하여 광대역 파장 가변 레이저 다이오드를 구현하는데 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

주제어 : Polymers, Integrated optics devices, Tunable, Resonator, Micro ring resonator, Planar lightwave circuit

I 서 론

저 손실 특성과 함께 우수한 열 광학 특성을 가지는 폴리머 재료의 개발과 함께 광 스위치, 광 감쇄기 파장 가변 필터 등 광통신 신호 처리용 집적광학 폴리머도파로 광소자에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔다. 폴리머 광 도파소자는 구조가 단순하며 제작공정이 간단하고, 이에 따라 저가격 대량생산에 유리하며, 레이저 다이오드, 광 검출 소자 등의 하이브리드 집적이 용이하다.

고도로 집적된 광 집적 회로를 실현하기 위한 단위 소자로서 마이크로 링 공진기(MRR: Micro-Ring Resonator)에 대한 연구가 널리 수행되고 있으며, 다양한 연구결과들이 보고되고 있다.^[1-5] 예를 들어 파장채널 가감필터, 전광스위치, 결합 링 공진기 도파로, 교차 도파로와 결합된 링 공진기, 링 공진기를 이용한 파장 가변 레이저 등이 링 공진기의 원리를 활용하여 연구되고 있다. 많은 연구 그룹들의 노력에 의하여 상당한 진전이 있었음에도 불구하고, 마이크로 링 공진기를 고집적 광 도파회로에 통상적으로 적용하기에는 추가적인 연구 개발이 심도 있게 진행 되어야 한다.

마이크로 링 공진기를 고 집적 광 회로에 통상적으로 적용하기 어려운 이유 중 하나는 공정 에러에 민감한 특성을 가지는 방향성 결합기 등의 문제로 인하여, 수율이 떨어지고 이에 따른 제작비용의 증가이다. 광 결합기의 결합 비율을 정확히 조절하고 집적도를 향상시키기 위한 방안으로서 다층도파구조를 바탕으로 MRR 집적소자가 구현된 바도 있다.^[6,7] 본 논문에서는 평판 광 도파회로 기반으로 소자를 설계하고 제작함으로써 공정과정을 단순화 하고자 하였다. 특히, 실제 공정상에서 발생할 수 있는 오차를 설계상에서 먼저 고려하여 공정오차가 약간 발생하더라도 원하는 특성의

광 결합비율과 곡선 도파로에서의 적은 굽음 손실을 얻을 수 있었다.

본 논문에서는 굴절률 차이가 큰 폴리머 광 도파로를 기반으로 한 MRR Add/Drop 필터를 제작하여 그 특성을 측정하였다. Add/Drop 필터는 반경이 약간 다른 두 개의 링이 결합된 상태로 구성 되었으며, 두 개의 링이 동시에 공진하는 파장 대역에서 강한 Drop 특성이 발생한다. 이와 같은 형태는 Vernier 효과를 유발하여 파장 가변 범위가 증대되어 수십 nm에 이르게 된다. 본 논문에서 구현한 광대역 파장가변 Add/Drop 필터를 반사형 반도체 광증폭기(R-SOA: Reflective Semiconductor Optical Amplifier) 또는 FP-LD(Fabry Perot-Laser Diode)와 하이브리드 집적하면 광대역 파장가변 레이저를 구성할 수 있을 것이다.^[9,10] 논문의 구성은 II장에서 평판 광 도파회로 기반의 Add/Drop 필터의 동작원리에 대해 간단히 설명하고, III장에서는 공정상의 오차를 고려한 Add/Drop 필터의 설계 및 제작을 언급하겠다. IV장에서는 Add/Drop 필터의 측정결과를 분석 하였으며, 마지막으로 V장에는 결과들을 정리하였다.

II. 평판 광 도파회로 기반의 Add/Drop 필터의 동작원리

본 논문에서 설계한 Add/Drop 필터의 개략적인 구조는 그림 1과 같다. Add/Drop 필터의 구성은 두개의 버스 도파로(I, II)와 두 개의 링 공진기(R_1 , R_2)로 구성되어 있으며, 동작 원리는 버스 도파로 I로 입사된 광파가 링(R_1)과 버스 도파로 I 사이의 광 결합을 통해 첫 번째 링 도파로로 결합 되고 다시 이는 두 번째 링으로 결합 되며 결국 버스도파로 II로 결합 된다.^[5]

링 공진기의 출력은 버스 도파로 I과 첫 번째 링 도파로 사이의 결합비율(κ_0), 첫 번째 링 도파로와 두 번째 링 도파로

[†] E-mail: ychung@kw.ac.kr

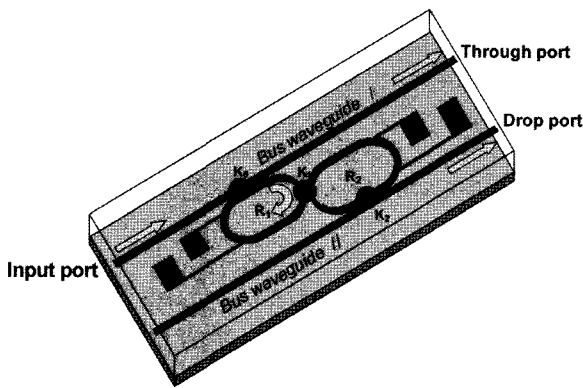


그림 1. 논문에서 제안한 Add/Drop 필터의 개략도.

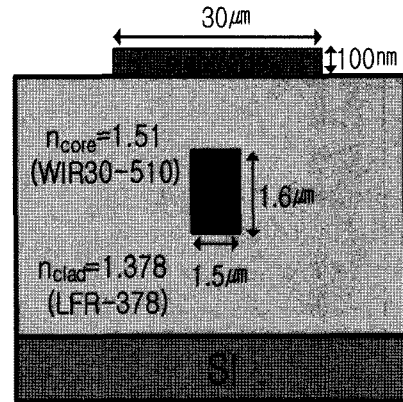


그림 2. Add/Drop 필터의 도파구조.

사이의 결합비율(k_1) 그리고 두 번째 링도파로와 버스 도파로 II 사이의 결합비율(k_2)에 의해 결정된다. 이때 링 공진기는 대칭 구조로 설계되었기 때문에 k_0 와 k_2 는 같다. 또한 버니어(Vernier) 효과에 의해 수 십 nm에 걸친 광대역 파장 가변을 위하여 두 링의 반경이 약간 다르게 구성 된다.

두 링의 주회 길이를 약간 다르게 설계함으로써 두 링은 약간 다른 FSR(Free Spectral Ranges)을 가지게 되며, 공진하는 파장들 또한 약간 다르게 된다. 이 경우에 두 링에서 공진하는 파장이 일치하는 경우에 강한 출력이 예상 된다. 한 쪽 링의 공진 파장의 미세 변화에 의해서도 전체 Add/Drop 필터의 드롭 특성에서는 한 FSR 만큼의 파장 이동을 유발시킬 수 있다. 즉, 버니어 효과를 통하여 한 쪽 링의 작은 굴절률 변화만으로 넓은 파장 가변이 가능하다. 파장가변 범위는 아래의 식 (1)과 같이 주어진다.

$$\Delta\lambda_{tune} = \frac{\lambda_0^2}{2\pi n_g (R_2 - R_1)} \tag{1}$$

두 링의 반지름이 150 μm , 156 μm 로 4% 차이나는 경우, 중심 파장 $\lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}$ 에서 군 굴절률 n_g 이 1.447일 때 파장가변 범위는 대략 44 nm도가 될 것으로 추측된다.

III. 공정상의 오차를 고려한 Add/Drop 필터의 설계 및 제작

본 논문에서 채택한 도파구조는 그림 2와 같은 매립형 도파구조로 코어의 폭과 높이는 각각 1.5 μm , 1.6 μm , 코어와 클래딩의 굴절률은 1550 nm 파장 대역에서 각각 1.51과 1.378로 13.2%의 높은 굴절률 차를 갖는다. 이러한 높은 굴절률 차는 굽음 손실(bending loss)과 링의 반경을 상당히 줄일 수 있기 때문에 작은 크기의 소자를 구현할 수 있는 기반이 된다.

그림 3은 링의 반경(radius)과 굽음 손실(bending loss)의 관계를 보여준다. 그림 3에서 반경이 120 μm 이상일 때 굽음 손실은 0.005 dB/cm 이하가 됨을 확인하였다. 따라서 설계상

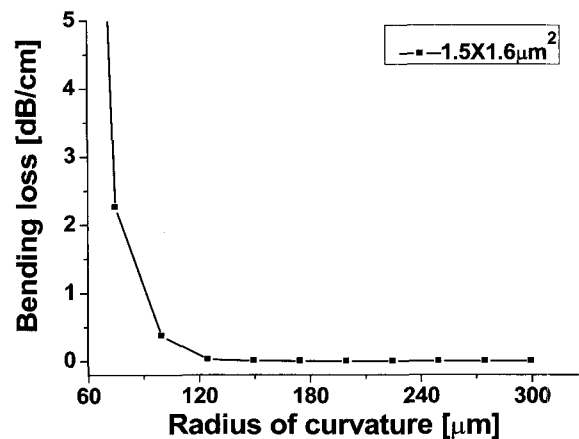


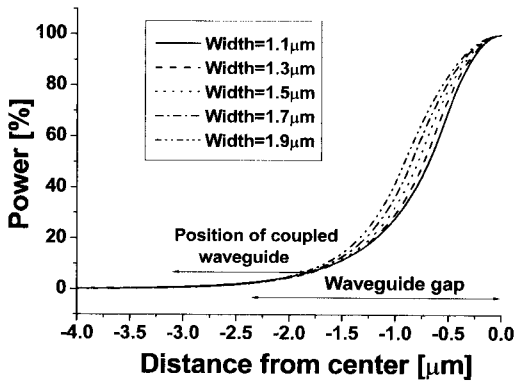
그림 3. 링의 반경에 따른 굽음 손실.

링의 반경에 대한 굽음 손실은 무시 될 정도로 작음을 알 수 있다.

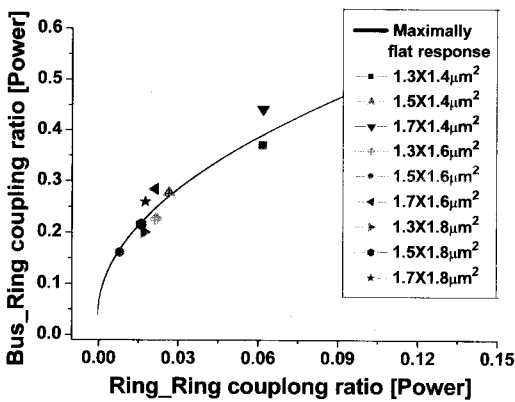
도파로 제작 과정 중 특히 사진식각 공정과 스핀 코팅 과정에서 공정오차가 발생하여 도파로의 폭과 두께가 설계값과 다르게 제작될 가능성이 상존한다. 본 연구에서는 도파로의 폭이 변화함에 따라서 도파모드의 형태가 둔감하게 변화하도록 도파로의 구조를 정하여 공정오차가 일정 부분 발생하는 경우에도 결합비율이 크게 변하지 않도록 하였다. 그림 2와 같은 도파로 구조에서 도파로 폭이 1.1 μm 에서 1.9 μm 사이에서 변화하는 경우의 도파 모드들을 계산하여 그림 4(a)에 도파 모드의 반쪽 영역만 나타내었다. 그림 4(a)에서 확인할 수 있듯이 본 논문에서 고려하는 폴리머 도파구조의 경우 도파로 중앙에서 2.3 μm 이상 떨어진 부분에서는 도파모드의 꼬리 모양이 도파로 폭이 상당히 변화하더라도 거의 같은 모양을 보임을 알 수 있다. 따라서 방향성 결합기에서 두 도파로의 중앙 사이의 간격이 2.3 μm 이상인 경우 도파로 폭의 변화에 대해 상당히 둔감한 방향성 결합기를 얻을 수 있을 것임을 짐작할 수 있다. 그림 4(b)에 단일 피크조건을 만족하는 링-링 결합비율과 버스-링 결합비율 관계를 실

선으로 나타내었고^[6], 도파로의 폭이 1.3, 1.5, 1.7 μm , 높이가 1.4, 1.6, 1.8 μm 일 때의 링-링 결합비율과 버스-링 결합비율을 각각 다양한 데이터 점으로 표기하였다. 공정오차가 $\pm 0.2 \mu\text{m}$ 정도 발생하여도 링-링, 버스-링 결합비율 쌍이 단일 피크 특성곡선에서 크게 벗어나지 않기 때문에 공정오차에 둔감한 특성을 보일 것으로 예측할 수 있다.

도파구조의 코어와 클래딩은 ChemOptics사의 WIR30-510과 LFR-378를 사용하였다. LFR-378를 12 μm 두께로 코팅하고 열 경화(Thermal curing) 및 자외선 경화(UV curing)하여 하부 클래딩을 형성하였다. 제작된 하부 클래딩 위에 포토리소그래피 공정으로 광도파로 패턴을 제작한 후 1.5~1.7 μm 깊이로 ICP etching을 한다. 그 위에 WIR30-510를 코팅하여 코어층을 완성하고 다시 LFR-378를 5.3 μm 두께로 코팅하여 상부 클래딩을 형성한다. 마지막으로 Cr(100 Å)와 Au(1000 Å)을 이용하여 메탈패턴을 형성(Metalization)하고 효율적인 광 결합을 위하여 입출력 단면을 절단(Dicing), 연마(Polishing) 공정을 수행하였다. 그림 5는 실제 제작된 Add/Drop 필터를 보여준다.



(a)



(b)

그림 4. 공정 오차에 따른 특성.

- (a) 도파로 폭의 변화에 따른 도파 모드 형태.
- (b) 단일 피크 조건을 만족하는 링-링 결합비율과 버스-링 결합비율 관계는 실선으로, 도파로 폭이 1.3, 1.5, 1.7 μm , 높이가 1.4, 1.6, 1.8 μm 일 때의 링-링 결합비율과 링-버스 결합비율을 다양한 데이터 점으로 표기하였다.

IV. Add/Drop 필터의 측정결과

그림 6은 제작된 Add/Drop 필터의 Through Port와 Drop Port의 파장에 따른 응답 특성을 보여준다. 도파로의 폭과 높이의 설계 값은 1.5 μm 와 1.6 μm 이고, 링 도파로의 반경은 150 μm 와 156 μm 인 경우이다. 그림 6(a)에서 1551.48 nm와 1596.31 nm 파장 근처에서 FSR이 다른 두 링의 공진 파장이 일치하여 주변보다 큰 출력을 보임을 알 수 있다. 이 Add/Drop 필터에서 튜닝 범위는 44.8 nm에 이를 것으로 기대되

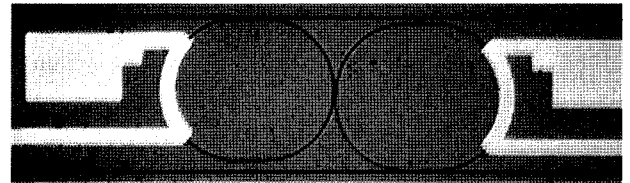
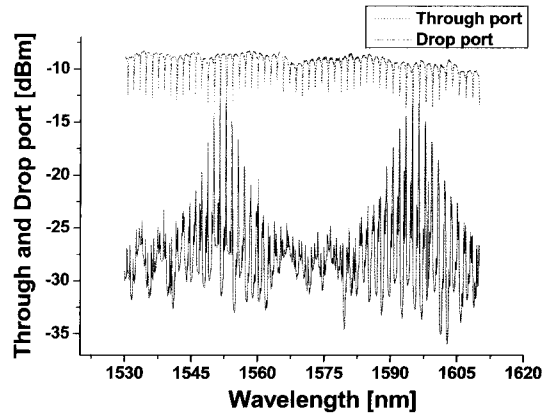
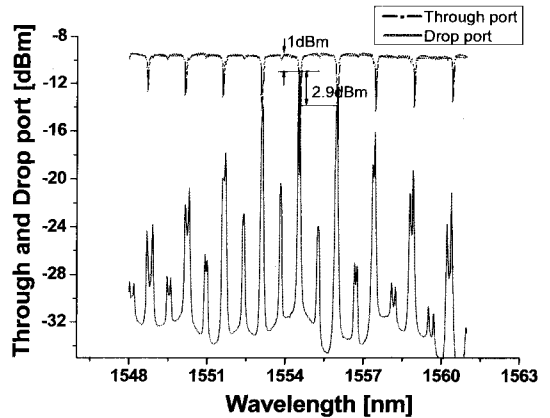


그림 5. 평판 광 도파회로(planar light-wave circuit)를 기반으로 제작된 Add/Drop 필터의 사진.



(a)



(b)

그림 6. Add/Drop 필터의 Through Port와 Drop Port의 광학적 응답 특성.

- (a) Add/Drop 필터의 튜닝 범위
- (b) 두 링의 공진파장이 일치 하는 파장에서의 출력특성

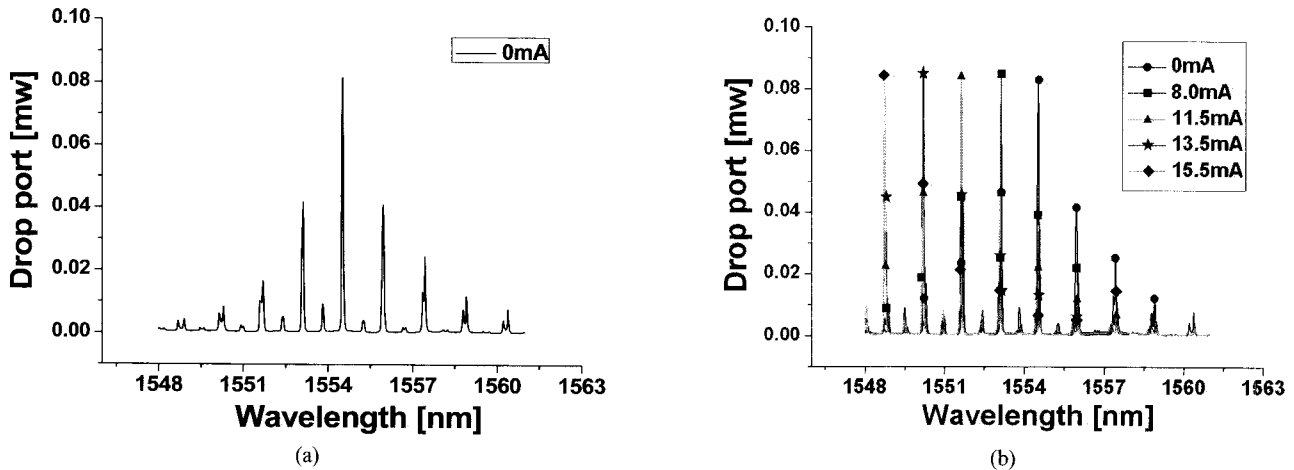


그림 7. 인가 전류에 따른 Add/Drop 필터의 튜닝 특성.
 (a) 전류가 0 mA일 때 Drop Port의 출력특성
 (b) 인가 전류에 따른 Drop Port의 튜닝특성

며 이는 II장에서 산정한 튜닝 파장 범위와 거의 일치한다.

그림 6(b)는 두 링의 공진 파장이 일치하는 파장대역의 응답특성으로 1554.5 nm 파장에서 Drop port의 응답특성은 주변 피크보다 약 2.9 dB 정도 높은 출력을 보이며 Through port의 배경 출력특성에 대하여 약 1 dB 정도 작다. 따라서 제작된 Add/Drop 필터는 링에서의 굽음 손실과 도파 손실은 1 dB 정도 발생한 것으로 추측 될 수 있다.

그림 7에서는 Add/Drop 필터의 튜닝 특성을 보여 준다. 전극의 폭과 두께는 각각 30 μm , 100 nm이며 길이는 원주의 1/4이다. 그림 7(a)는 전류가 0 mA일 때 Drop port의 특성을 실선으로 나타낸 것으로 FSR은 1.44 nm로 예상과 동일하였다. 그림 7(b)에서는 반경이 156 μm 인 링의 전류를 인가하였을 때 Add/Drop 필터의 튜닝 특성을 보여준다. 전류가 증가 할수록 반경이 156 μm 인 링의 유효굴절률은 감소 되어 링에서 공진하는 파장대역은 짧은 파장으로 이동한다. 따라서 두 링이 동시에 공진하는 공진파장은 전류의 증가에 따라 짧은 파장 쪽으로 이동함을 관측할 수 있다. 다섯 FSR 범위를 튜닝하는데 오직 15.5 mA의 인가 전류만으로 가능했다. 전체 44.8 nm 범위를 튜닝하는 데는 약 96.4 mA의 인가 전류가 소요될 것임을 예측할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 굴절률 차이가 큰 폴리머를 이용하여 광대역 파장가변 Add/Drop 필터를 제작 하였다. 공정오차에 둔감한 특성을 가지는 방향성 결합기를 설계하여 사용함으로써, 구현된 Add/Drop 필터는 도파로 폭의 공정오차 $\pm 0.2 \mu\text{m}$ 정도에 대해서 둔감한 특성을 보일 것으로 예측된다. 이중 링 구조의 Add/Drop 필터를 고려하였고, 적은 양의 전류만으로 광대역 튜닝을 할 수 있도록 버니어 효과를 사용하기 위해 두 링의 반경을 4% 차이 나게 설계하였다.

제작된 Add/Drop 필터의 파장가변 범위는 44.8 nm로 계산 값과 거의 일치하고 FSR은 1.44 nm로 계산 값과 거의 일치함을 확인 할 수 있었다. 제작된 Add/Drop 필터는 두 링의 공진 파장이 일치하는 파장대역의 Drop port 응답 특성은 주변의 피크 보다 2.9 dB 정도 큰 특성을 얻었다. 이 정도의 차이는 독립적인 DWDM 용 필터로 활용하기에는 충분하지가 않다. 그럼에도 불구하고, Add/Drop 필터의 Drop port에 약 80% 정도의 고반사 코팅을 하고, 입력 단에 무반사 코팅된 Fabry-Perot 레이저 다이오드를 하이브리드 집적하면, 수십 nm에 걸쳐서 파장을 가변할 수 있는 저가의 레이저 다이오드를 구현할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 한국과학재단 특정기초연구비[R01-2006-000-10751-0] 지원에 의하여 수행 되었습니다.

참고문헌

- [1] P. Rabiei, W. H. Steier, C. Zhang, and L R. Dalton, "Polymer micro-ring filters and modulators," *J. Lightwave Technol.*, vol. 20, no. 11, pp. 1968-1975, 2002.
- [2] Poon, J. K. S, Lin zhu, Guuy A. DeRose, and a. Yariv "Polymer microring coupled-resonator optical waveguides," *J. Lightwave Technol.*, vol. 24, no. 4, pp. 1843-1849, 2006.
- [3] 정영철, 김수현, Nadir Dagli, 김두근, "[광기술 연구·개발현황] 마이크로 링 공진기 광집적 소자 기술", *광학기술*, vol. 9, no 4, pp. 32-39, 2005.
- [4] 김건덕, 이상신, "폴리머 링 공진기 기반의 스위치를 이용한 집적광학 채널 선택 마이크로웨이브 대역통과 필터", *한국광학학회지*, 제18권, 1호, pp. 79-83, 2007.
- [5] A. Yariv, "Universal relations for coupling of optical power

- between micro resonators and dielectric waveguides,” *Electron. Lett.*, vol. 36, no. 4, pp. 321-322, 2000.
- [6] B. E. Little *et al.*, “Microring Resonator Channel Dropping Filters,” *J. Lightwave Technol.*, vol. 15, no. 6, pp. 998-1004, 1997.
- [7] Chyng Wen Tee, Kevin A. Williams, Richard V. Penty, Ian H. White, “Fabrication-Tolerant Active-Passive Integration Scheme for Vertically Coupled Microring Resonator,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 12, no. 1, pp. 108-116, 2006.
- [8] 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, no. 2, pp. 115-117, 1999.
- [9] Dominik G. Rabus, Zhixi Bian, and Ali Shakouri, “A GaInAsP-InP Double-Ring Resonator Coupled Laser,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 17, no. 9, pp. 1770-1772, 2005.
- [10] Bin Liu, Ali Shakouri, and John E. Bowers, “Wide Tunable Double Ring Resonator Coupled Lasers,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, no. 5, pp. 600-602, 2002.

Widely Tunable Double-Ring-Resonator Add/Drop Filter

Donghyun Lee, Taehyung Lee, Joonoh Park, Suhyun Kim, and Youngchul Chung[†]

Department of Electronics and Communications Engineering, Kwangwoon University, Seoul, Korea

[†]*E-mail: ychung@kw.ac.kr*

(Received June 5, 2006, Revised manuscript June 16, 2007)

A widely tunable add/drop filter composed of double ring resonators is implemented with high-index-contrast polymer waveguide. To enhance the productivity, directional couplers are designed to have good fabrication tolerance. The refractive indices of the core and cladding in the 1550 nm wavelength are 1.51 and 1.378, respectively. Drop response in comparison with neighborhood peak gets enhanced by more than 2.9 dB at the wavelength where both rings resonate. This filter can be used to build widely tunable laser diode through hybrid-integration with reflective SOA.

OCIS code : 160.5470, 230.3120, 140.3600, 140.4780.