

삼중 결합 링 공진기 필터의 설계 및 제작

이영식 · 정영철[†]

광운대학교 전자통신공학과
 ☎ 139-701 서울특별시 노원구 월계동 447-1

(2011년 1월 10일 받음, 2011년 2월 9일 수정본 받음, 2011년 2월 14일 게재 확정)

동일한 주회 길이의 통상적인 DCRR (Double-coupler Ring Resonator) 에 비하여 두 배의 FSR (Free Spectral Range) 성능을 나타낼 수 있는 TCRR (Triple-coupler Ring Resonator: 삼중 결합 링 공진기) 필터의 설계 및 제작에 대하여 논의하였다. 열-광학 특성이 우수하고, 코어-클래딩 굴절률 차가 큰 폴리머 물질을 이용하여 작은 반경의 곡선도파로가 가능한 매립형 도파구조의 컴팩트한 TCRR 필터를 설계 및 제작하였다. 파장가변 레이저와 광섬유 배열 블록을 이용하여 TCRR 필터의 Through 및 Drop 포트 출력 특성을 측정하고, DCRR 필터의 두 배인 4.4 nm의 FSR을 확인하였고, 이는 전달행렬 방법을 이용하여 해석한 결과와 거의 동일하였다.

Design and Fabrication of Triple-coupler Ring Resonator Filter

Young-Sik Lee and Youngchul Chung[†]

Department of Electronics and Communications Engineering, Kwangwoon University
 447-1 Wolgye-dong, Nowon-gu, Seoul 139-701, Korea

(Received January 10, 2011; Revised manuscript February 9, 2011; Accepted February 14, 2011)

Design and fabrication of a TCRR (Triple-coupler Ring Resonator) filter which can provide a doubled FSR (Free Spectral Range) compared with a conventional DCRR (Double-coupler Ring Resonator) filter, are discussed. Through the use of a polymer material with a good thermo-optic property and with high contrast between core and cladding polymer, a compact TCRR filter composed of straight and curved buried waveguides of small radius is designed and fabricated. The transmission characteristics from the through and drop ports are measured using a tunable laser and a fiber array block, and the FSR is observed to be 4.4 nm, about twice that of DCRR filter, and almost the same as that obtained from the analysis using a transfer matrix method.

Keywords: Polymers, Optical Resonators, Wavelength filtering devices

OCIS codes: (160.5470) Polymers; (140.4780) Optical Resonators; (130.7408) Wavelength filtering devices

I. 서 론

마이크로 링 공진기 (MRR : Micro Ring Resonator)는 다양한 광 신호 처리 기능과 작은 크기에서 비롯된 고도의 집적 가능성을 바탕으로 차세대 광집적 회로를 실현하기 위한 단위소자로서 활발한 연구가 진행 중인 소자이다^[1-2]. 최근에는 마이크로 링 공진기의 파장 선택성을 이용하여 광 센서나 광 스위치, 파장 선택 필터 등으로도 활발히 연구되고 있다^[3-5].

마이크로 링 공진기 기반의 필터는 주기적인 공진 파장간의 간격을 의미하는 FSR (Free Spectral Range)과 채널 선택

의 효율성을 의미하는 finesse, 채널에 있는 혼선레벨의 허용 한계를 결정하는 소광비율, 그리고 삽입 손실 등에 있어서 적절한 특성을 나타내어야 한다. 특히 열광학 특성이나 전기 광학 특성을 이용하여 필터 중심 파장을 이동하는 데 있어서, 그 이동 범위는 FSR에 의하여 제한된다. 한편 FSR은 공진기의 주회 반경에 반비례하기 때문에, FSR을 크게 하기 위해서는 링 공진기에 포함되는 곡선 도파로의 곡률 반경이 작아야 한다. 반면에 곡선 도파로의 반경이 너무 작으면, 굽음 손실 (bending loss)에 의하여 링 공진기 도파 손실이 커지게 되고 공진기의 Q 값이 작아짐으로서 finesse 특성이 악화되게 된다^[6]. 결국 링 공진기에서 얻을 수 있는 최대의

[†]E-mail: ychung@kw.ac.kr

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

FSR은 굽음 손실의 최대 수용 범위 내에서 링 반경을 최소화함으로써 결정지을 수 있다. 도파로 링 공진기에서 FSR을 증가시키려는 목적으로 다양한 솔루션들이 많은 연구결과에 의해 보고되고 있는데, 대표적으로 반경이 서로 다른 두 링 공진기 한 쪽이 결합되어 버니어 효과¹⁷⁾를 이용해 높은 FSR과 높은 finesse를 얻을 수 있음을 보인 바 있다. 하지만 두 개의 링 공진기를 직렬로 사용함으로써 늘어나게 된 면적의 증가를 감수해야 한다. 반면에 동일한 버니어 효과를 이용하고 면적 증가를 최소화하기 위해 두 개의 도파로와 한 개의 링 공진기가 3 개의 결합기로 연결된 형태의 삼중 결합 링 공진기(TCRR : Triple-Coupler Ring Resonator) 필터⁸⁾를 이용하면, 동일한 곡률 반경의 링 공진기 구조를 이용하더라도 두 배의 FSR을 얻을 수 있음이 이론적으로 확인된 바 있다. 본 논문에서는 제안된 TCRR 필터를 폴리머 도파로를 이용하여 구현하고자 하였다. 열 광학 특성이 우수하고, 도파로를 이루는 코어와 클래딩의 굴절률 차가 높은 폴리머 물질을 이용하여 작은 곡률 반경을 얻고자 하였다. 폴리머 도파로 TCRR 필터를 설계하였고, 전달 행렬 방법을 이용하여 특성을 예측하였다. 시뮬레이션을 통한 분석 결과와 제작된 소자의 특성 측정 결과를 비교한 결과, FSR이 이론적인 예측과 부합하게 두 배로 나타남을 확인하여, TCRR 광필터의 실질적인 활용 가능성을 확인하였다.

II. TCRR 필터의 원리

TCRR 필터는 그림 1과 같이 3개의 방향성 결합기와 반경이 r 인 한 개의 링 도파로 및 링 공진기를 감싸고 있는 두 개의 도파로로 구성되어 있다. 상부의 도파로는 링 도파로와 두 군데서 κ_1, κ_2 의 비율로 결합되어 있고, 하부의 버스 도파로는 링 도파로와 한번 κ_3 의 비율로 결합된다. 링 상부에 위치한 첫 번째 도파로는 내부 링 공진기의 곡률 반경과 일치하는 반경을 가지고 있다. $l_i (i=1, 2, 3, 4)$ 는 결합기 사이의 거리를 나타낸다. TCRR 필터 내에는 두 개의 폐쇄 루프가 존재하는데, 하나의 루프는 전체 길이가 $L_1 = l_1 + l_3 + l_4$ 인 루프이고 또 하나는 $L_2 = l_2 + l_3 + l_4$ 인 링 공진기 경로이

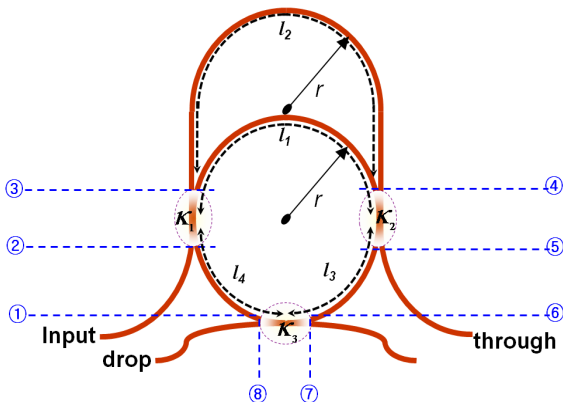


FIG. 1. Schematic diagram of triple-coupler ring resonator filter.

다. 이때 두 폐쇄 루프는 링 공진기의 하부 도파로 (l_3, l_4)를 공유하게 된다. 여기서 l_2 은 l_1 의 두 배가 되어야 한다. 따라서 입력포트로 입사 된 광파는 결합비가 κ_1 인 결합기를 통해 링의 일부 (l_1)와 링 공진기 상부에 위치한 도파로 (l_2)로 나뉘어 진행하고, 결합비가 κ_2 인 결합기를 거쳐 through 포트에 출력된다. 이 때 결합비율이 κ_2 인 결합기에서 결합되지 않은 광파의 일부가 링 공진기 하부에 위치한 결합기(κ_3)를 거쳐 입력 포트 하단에 위치한 drop 포트를 통해 출력되게 된다. 여기서 결합기 κ_1 을 지나 결합기 κ_2 로 진행하는 광파는 길이가 서로 다른 두 개의 도파로를 통과하게 되는데, 이때 길이가 l_2 인 도파로를 지나는 광파의 위상이 지연되어 버니어 효과가 발생하게 된다. 또한 TCRR의 삽입 손실을 최소화하기 위해서 각 결합기의 결합비율은 식 (1)의 조건을 충족시켜야 한다⁸⁾.

$$\begin{cases} \kappa_2 = \kappa_1 \\ \kappa_3 = 2\kappa_1 t_1 \\ (t_i = \sqrt{1 - \kappa_i} \quad i = 1, 2, 3) \end{cases} \quad (1)$$

앞서 기술한 TCRR 필터의 전송특성을 분석하기 위해서 전송행렬(Transfer Matrix)법을 이용하여 분석하였다. 그림 2(a)처럼 각 결합기를 통과하는 광파는 식 (2)의 행렬로 정의된다.

$$\begin{bmatrix} b_{1j} \\ b_{2j} \end{bmatrix} = [H_{\kappa}] \begin{bmatrix} a_{1i} \\ a_{2i} \end{bmatrix} \quad (2)$$

이때 행렬 H_{κ} 는 식 (3)와 같다.

$$[H_{\kappa}] = q \begin{bmatrix} \sqrt{1 - \kappa^2} & -j\kappa \\ -j\kappa & \sqrt{1 - \kappa^2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 q 는 결합기의 진폭 투과 계수를 의미한다. 또한 결합기와 결합기 사이의 곡선 도파로를 진행하면서 광파가 겪는 위상변화 및 그림 2(b)와 같이 두 배의 지연을 갖는 구간 (l_1, l_2)을 통과하는 광파를 식 (4)와 같이 $H_{l,r}$ 행렬로 나타내었다⁸⁾.

$$[H_{l,r}] = \begin{bmatrix} e^{-j(\beta - j\alpha)l} & 0 \\ 0 & e^{-j(\beta - j\alpha)l'} \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서 α 는 곡률 반경이 r 인 도파로의 진폭 감쇠 계수를

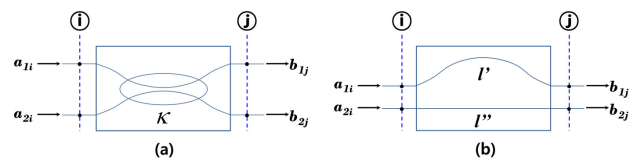


FIG. 2. Schematic diagram of (a) coupler block and (b) double delay block.

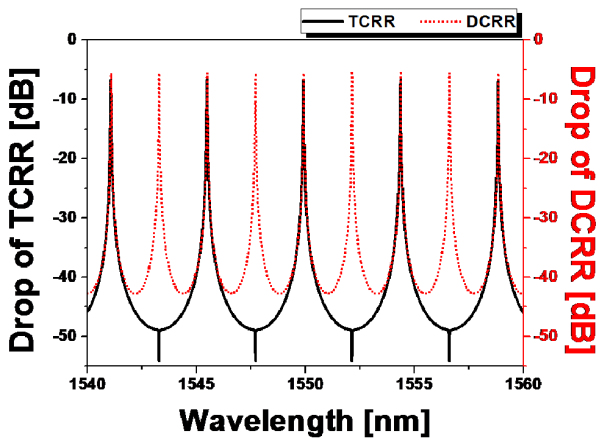


FIG. 3. Drop port characteristics of TCRR filter and DCRR filter.

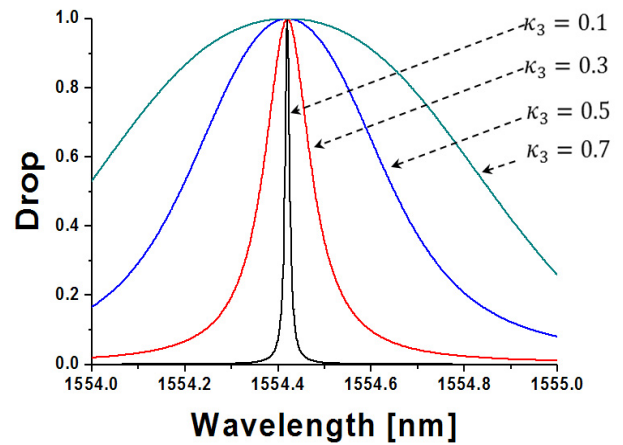


FIG. 4. Drop port characteristics for various coupling ratio values.

나타내고 β 는 위상계수를 의미한다.

따라서 식 (3)과 식 (4)를 이용하여 TCRR 필터를 거친 특성은 전달행렬 방법을 통하여 식 (5)로 나타낼 수 있다.^[8-9]

$$T_{through} = \left| \frac{b_{16}}{a_{11}} \right|^2 = \left| \frac{q^2(\kappa_1\kappa_2p_1 - t_1t_2p_2) + q^5t_3p_1p_2p_3p_4}{q^3t_3p_3p_4(t_1t_2p_1 - \kappa_1\kappa_2p_2) - 1} \right|^2 \quad (5a)$$

$$Drop = \left| \frac{b_{18}}{a_{11}} \right|^2 = \left| \frac{q^3\kappa_3p_3(\kappa_1t_2p_1 - t_1\kappa_2p_2)}{q^3t_3p_3p_4(t_1t_2p_1 - \kappa_1\kappa_2p_2) - 1} \right|^2 \quad (5b)$$

$$(p_i = e^{-j(\beta - j\alpha)_i}, i = 1, 2, 3, 4)$$

DCRR (Double Coupler Ring Resonator) 필터와 동일한 크기의 반경을 갖는 TCRR 필터의 특성을 비교해 보았다. 그림 3은 손실 값을 1.5 dB/cm으로 가정하고, 반경이 100 μm (링 공진기 둘레 : 약 628.3 μm), 중심파장(λ_0)은 1550 nm, 유효굴절률(n_{eff})은 1.440674, κ_3 의 결합비가 0.12일 때 drop 포트의 특성을 나타낸 것이다. 이때 κ_1 과 κ_2 는 식 (1)에 의하여 0.0508의 값을 갖게 된다. TCRR 필터의 FSR은 4.4 nm로서 링 공진기의 반경이 100 μm 로 동일한 DCRR의 FSR에 비하여 두 배의 크기를 갖는 것을 확인 할 수 있다.

TCRR 필터의 Drop의 선폭특성을 알아보기 위해 κ_3 의 결합비율을 변경시키면서 특성을 분석해 보았고 그 결과를 그림 4에 도시하였다. κ_3 의 결합비가 클수록 Drop 선폭이 넓어지고 작을수록 좁아진다. 공진기의 파장이동 특성을 파악해 보기 위해 링 공진기의 반경을 100 μm , 결합비율 κ_3 는 0.12, 중심파장 λ_0 은 1550 nm로 고정하고, 유효굴절률(n_{eff})을 최초 1.440674로 정하여 0.0005(0.0347%)씩 변화시키면서 그에 따른 Drop의 피크의 이동성을 시뮬레이션 하였고 그림 5에 도시하였다. 링 도파로의 유효 굴절률이 감소할수록 Drop 피크가 단파장 대역으로 이동하였고, 0.004(약 0.28%) 만큼 변할 때 한 FSR을 이동하는 것을 확인하였다.

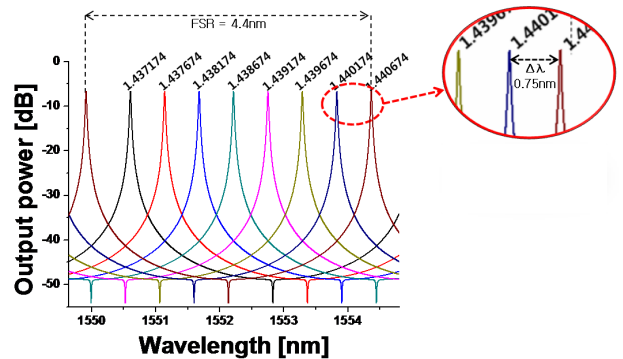


FIG. 5. Tuning characteristics for various effective refractive indices.

III. TCRR 필터의 설계 및 제작

TCRR 필터의 제작에 기본이 되는 도파로를 설계하기 위해 코어와 클래딩의 물질을 선택하여 도파 구조를 설계하였고 소자와 광섬유와의 정렬 시, 효율적인 입사를 위한 입사력포트에서 광섬유와의 모드 매칭조건을 고려하여 테이퍼 구조를 설계하였다.

코어는 폭 1.5 μm 와 높이 1.6 μm 의 직사각형 구조이며 코어와 클래딩의 굴절률을 각각 1.51과 1.378로 하여, 약 8.7%의 고 굴절률차를 갖게 함으로써 빛이 코어 영역에 대부분 구속되는 구조를 선택하였다. 그림 6(a)에는 본 논문에서 TCRR 필터 제작을 위해 선택한 매립형 도파로 구조의 단면을 나타내었고, 그림 6(b)에는 3차원 빔 전송법 (3-dimensional Beam Propagation Method)을 이용하여 얻은 모드의 계산 결과를 나타내었다. 도파로로 입사된 빛이 코어에 잘 구속되어 있으며, 매우 작은 곡률 반경의 곡선 도파로를 채용할 수 있을 것임을 정성적으로 예측할 수 있다. TCRR 필터에 광원을 입사시켜 CCD 카메라를 통해 출력을 확인한 결과, 그림 6(c)에 보인 바와 같이 입사된 빛이 도파로의 코어 영역에 잘 구속되어 도파되는 것을 확인할 수 있었다.

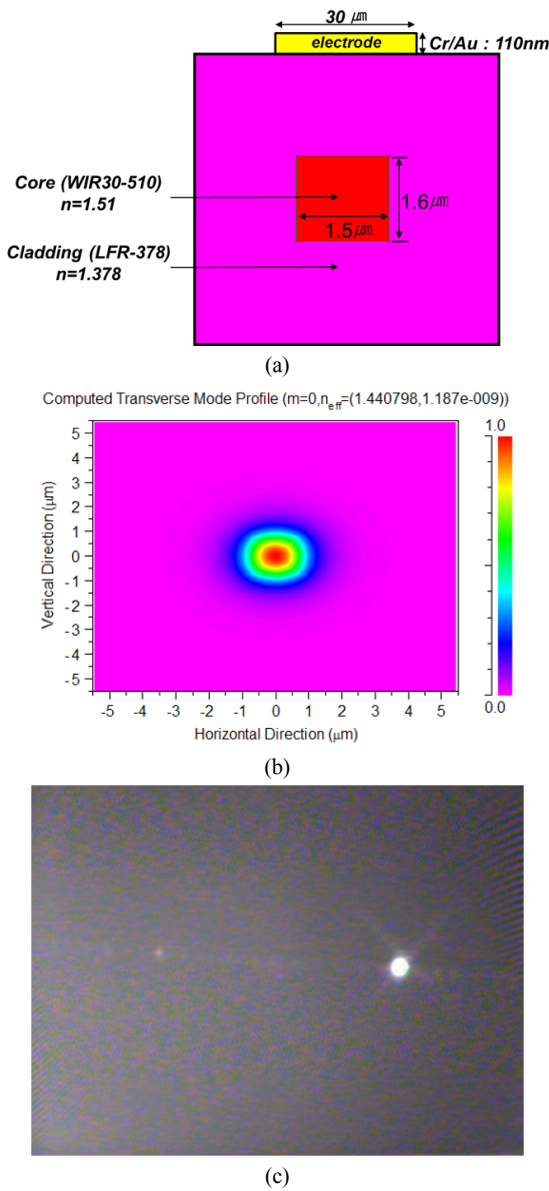


FIG. 6. (a) Cross-section of the buried waveguide structure, (b) calculated mode profile, and (c) measured mode profile.

공정 오차에 강건한 방향성 결합기를 설계하기 위해 커플링 되는 두 도파로 사이에 적절한 간격을 설정하여 실제 제작 시 공정오차에는 둔감하게 동작할 수 있도록 설계하였다. 방향성 결합기가 공정에 둔감하기 위해서는 도파로 폭이 변화함에 따라서 도파 모드의 형태가 둔감하게 변화하는 지점에 커플링 되는 상대 도파로를 위치시킬 필요가 있다. 설계의 예로써 그림 6(a)와 같은 도파구조를 고려하여 그림 7(a)와 같이 방향성 결합기를 설계하였을 경우, 도파구조의 x 방향 모드의 형태를 확인하기 위하여 유효굴절률 근사법(Effective Index Method)을 이용하여 3차원의 도파구조를 2차원 구조로 근사화한 후 도파로를 진행하는 모드필드의 형태를 구하였다. 이때 도파로 폭이 제안한 오차 범위 내에서 변화할 경우 도파모드를 계산하여 반쪽영역만 나타내면 그림 7(b)와

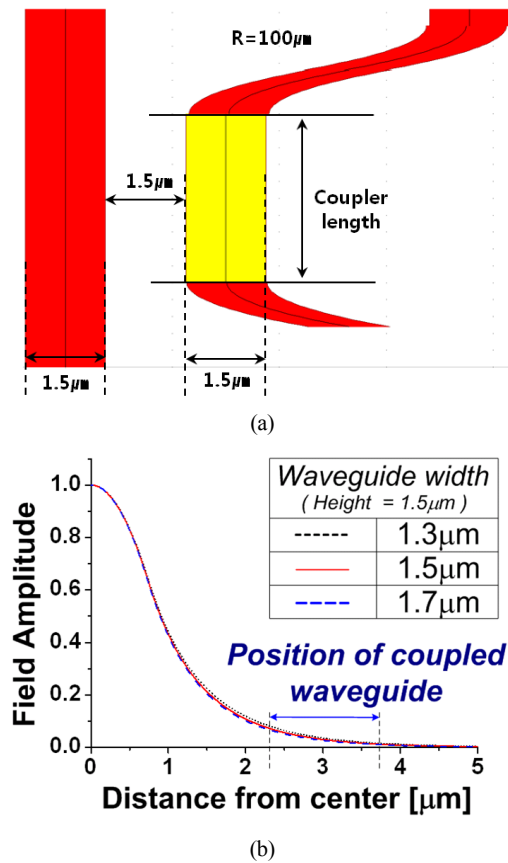


FIG. 7. (a) Directional coupler design and (b) propagation mode for three different waveguide widths.

같이 나타나게 된다. 그림 7(b)에서 확인할 수 있듯이 코어 도파로 중앙에서 3 μm 떨어진 부분에서는 도파로의 폭이 ±0.2 μm 변화하더라도 도파 모드의 형태가 거의 유지되는 것을 알 수 있다. 이 경우 커플링 되는 상대 도파로를 적절히 위치시킨다면 상대 도파로로 전이되는 광 파워의 양을 상대적으로 일정하게 유지시킬 수 있으며, 이러한 특성을 통하여 도파로 폭 변화에 상당히 둔감한 특성의 방향성 결합기를 얻을 수 있을 것으로 짐작할 수 있다.

측정 시 제작된 소자와의 모드 부정합은 삽입 손실을 야기하기 때문에 모드매칭을 통해 손실을 최소화해야 한다. 시뮬레이션 결과, 800 μm 이상의 길이에 걸쳐서 도파로의 너비를 1.5 μm에서 12 μm로 증가시키는 테이퍼의 경우 손실이 테이퍼 손실이 거의 무시될 수 있음을 알 수 있었다. 입출력 도파로의 폭이 12 μm 인 경우가 광섬유와 TCRR 필터 소자와의 결합손실을 최소화 할 수 있음을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다. 설계한 TCRR 필터는 구조적 특성 상 그림 8에 보인 바와 같이 Drop 포트가 입력포트 하단에 위치하기 때문에 배열형 광섬유 블록 (Fiber array block) 를 사용하여 측정하여야 한다. 이를 위하여 입력 포트 도파로와 Drop 포트 도파로의 간격은 배열형 광섬유 채널의 간격과 맞추어 250 μm로 설계를 하였다. 이를 종합하여 소자 제작을 위한 마스크 패터닝을 진행하였으며 (주)PKL에 의뢰하여 마스크

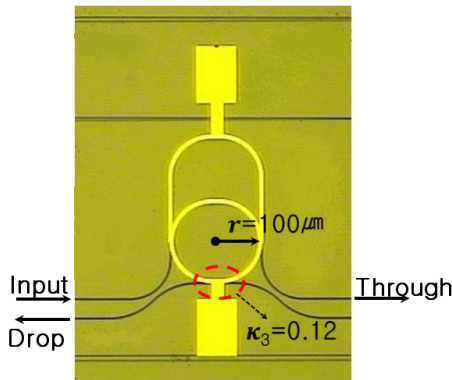


FIG. 8. Microscopic view of the fabricated TCRR filter.

를 제작하였다. 또한 본 논문에서 채택한 매립형 도파구조를 제작하기 위해 코어와 클래딩은 Chem-Optics사의 WIR30-510과 LFR-378의 저 손실 폴리머 물질로 채택하였으며, Chem-Optics사의 도파로 제작공정을 이용하여 TCRR 필터를 제작하였다.

IV. 제작된 TCRR 필터의 특성 측정

제작된 소자의 현미경 사진을 그림 8에 나타내었다. 제작된 TCRR 필터는 반경이 $100\mu\text{m}$ 이고 κ_3 의 결합비가 0.12이다. 광섬유와 결합되는 입력과 Drop 포트의 간격은 $250\mu\text{m}$ 로 설계하여 제작하였지만 실제 광파 특성에 영향을 주는 삼중 결합구조를 확대하여 촬영을 하였기 때문에 $250\mu\text{m}$ 간격을 형성하기 위해 사용한 S-Band 형태의 도파로 일부만 확인할 수 있다. TCRR 상부 표면에 증착된 전극은 TCRR 필터의 파장가변 특성 측정을 위해 구비된 것으로 전극에 전류를 인가하면 두 전극 사이의 도선에 열이 발생하게 되고 발생하는 열은 인가되는 전류량에 의해 제어된다. 이로 인해 링 공진기의 굴절률이 변하게 되고 TCRR 필터의 공진특성에 영향을 주어 필터링 되는 파장이 이동하게 된다. 본 연구에서 제작된 TCRR 필터의 FSR 특성 자체를 측정하는 데에 초점을 두었기에 파장가변 특성 측정은 진행하지 않았다.

그림 9는 제작된 TCRR 필터 특성을 실험하기 위한 측정 구성도이다. 파장 가변 레이저를 이용하여 6 dBm의 파워로 1540 nm 에서 1560 nm 까지 파장 가변하는 광파를 입력하여 편광조절기(Polarization Controller)를 거쳐 배열형 광섬유 블럭을 통해 TCRR 필터로 입사시킨다. 입력 부분에 배열형 광섬유 블럭을 사용한 이유는 III장 설계부분에서 기술한 바와 같이 입력 도파로와 drop 포트 도파로가 입력 면에 있기 때문에 채널 간격이 $250\mu\text{m}$ 로 제작된 배열형 광섬유 블럭을 사용하였다. 측정 시 실내 온도는 25°C 이었으며, 소자의 표면 온도는 TEC(Thermoelectric Cooling) 모듈을 사용하여 실온에 맞춰 25°C 로 고정하였다.

그림 10(a)는 설계된 TCRR 필터의 시뮬레이션 결과이다. 링의 반경은 $100\mu\text{m}$, 도파손실은 1.5dB/cm , κ_3 광 결합기의

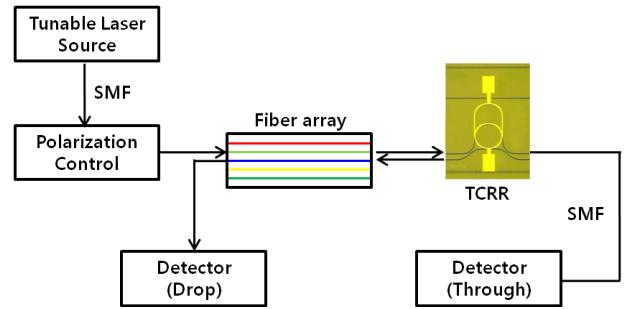


FIG. 9. Measurement set-up for the TCRR filter.

결합비율은 0.12로 설정하고 중심주파수를 1550 nm , 유효굴절률(n_{eff})을 1.440674로 설정하여 시뮬레이션 한 결과이고 FSR은 4.4 nm 로 나타남을 알 수 있다. 그림 10(b)와 (c)는 제작된 TCRR 필터의 특성을 그림 9의 구성에 의해 측정된 결과를 나타낸다. 그림 10(b)는 편광을 고려하지 않고 측정된 결과이다. 매 공진파장에서 TE모드의 편파와 TM모드의 편파가 혼합되어 측정되었다. 따라서 편광조절기의 적절한 조절을 통해 TE 모드성분의 광파만을 입사시켜 그림 10(c)의 결과를 얻었다. FSR은 4.4 nm 로 측정되었고, 이는 계산 결과와 유사함을 알 수 있다. 그림 10(b)로부터 편광에 따른 공진파장의 차이는 약 0.9 nm 임을 알 수 있다.

제작된 TCRR 필터의 도파손실을 측정하기 위해 마스크 제작 시 길이가 서로 다른 두 개의 직선도파로($7,500\mu\text{m}$, $15,000\mu\text{m}$)를 제작하였고 여기에 Tunable Laser Diode를 이용하여 6 dBm 의 광파를 입사시켰다. 길이가 상이한 두 도파로의 출력 파워를 비교한 결과 도파손실이 1.25 dB/cm 로 측정되었다. 또한 그림 10(c)와 같이 6 dBm 의 광파를 입사시켜 TCRR 필터를 통과한 비공진 파장에서의 Through 포트 출력이 -3.1 dBm 으로 측정되었다. 즉, 결합 손실 및 TCRR 필터의 도파손실을 포함하여 총 9.1 dB 의 손실이 발생하였다. TCRR 필터의 입-출력 간 버스 도파로 길이는 약 $8,000\mu\text{m}$ 임으로 도파손실은 약 1 dB 이다. 따라서 TCRR 필터의 입출력 양 포트에서 발생하는 결합손실은 약 8.1 dB 로 추정된다. 단일 모드 광섬유와 폴리머 도파로 간의 결합손실을 3차원 BPM을 통해 시뮬레이션한 결과 3 dB 로 계산되었다. 따라서 이론적인 입-출력 결합 손실은 6 dB 이고, 이는 측정치인 8.1 dB 와 비교하여 약 2.1 dB 정도 차이가 난다. 이 차이는 능동정렬 시 단일 모드 광섬유와 TCRR 필터 간에 존재하는 에어갭 및 불완전한 정렬에 의한 손실로 추정된다.

공진 Peak에서의 파장을 살펴보면, 그림 10(a)와 10(c)에서 보인 바와 같이 실험치와 설계치 사이에 미세한 차이를 확인할 수 있다. 이는 시뮬레이션에 사용한 유효굴절률과 제작된 TCRR의 실제 유효굴절률의 차이에 의한 것으로 추측된다. 측정된 TCRR 필터의 공진파장에 대응되는 유효굴절률은 1.43588이므로, 시뮬레이션에서 사용한 유효굴절률과 제작된 TCRR 필터의 유효굴절률 차이는 0.004794이다.

결과적으로 필터링 되는 파장특성의 관점에서 시뮬레이션

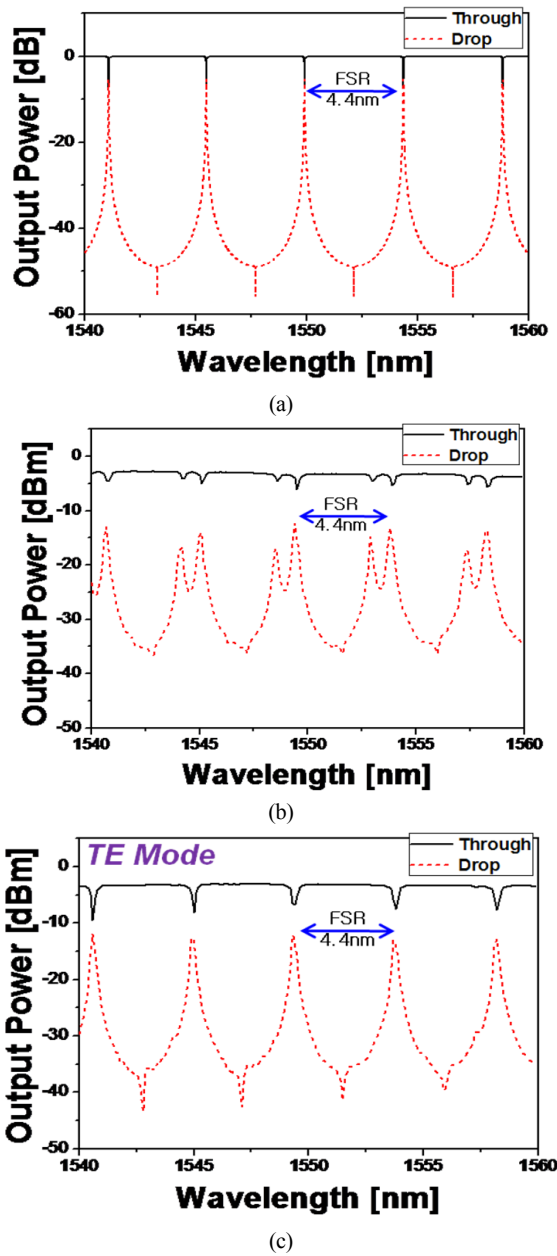


FIG. 10. (a) Simulation and (b) measurement results of the TCRR filter before polarization control and (c) after polarization control.

결과인 그림 10(a)와 FSR이 일치하였으며, DCRR 필터의 2 배의 FSR을 갖는 조건을 충족시켰다.

V. 결 론

본 논문에서는 통상적으로 두 번의 결합을 갖는 링 공진기의 FSR을 배가하기 위한 방법으로 제안된 TCRR 필터를 전송 행렬 법을 이용해서 이론적으로 분석하여 동작특성을 확인하였고, 다양한 결합 비에 따른 출력특성을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다. TCRR 필터는 하나의 링 도파로 외곽에

두 군데서 결합시켜서 외곽의 추가 공진기를 구성함으로써, 버니어 효과를 유발하여 FSR을 배가시키게 된다. 내부 링의 둘레가 $628.3\mu\text{m}$ 이고, 외곽 링을 형성하는 방향성 결합기의 결합비율(κ_1, κ_2)이 0.061이고, κ_3 의 결합비율이 0.12로 제작된 TCRR 필터는 4.4nm의 FSR을 갖는 것으로 측정되었고, 이는 DCRR에 비하여 두 배의 FSR을 나타내는 시뮬레이션 결과와 거의 일치함을 확인하였다. 이를 통하여 특정 주파 길이의 링 공진기에 대하여, TCRR 구조를 활용하는 경우 파장 가변 범위를 배가시킬 수 있음을 실험적으로 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2010-0008566)

References

1. A. A. Agarwal, P. Toliver, R. Menendez, S. Etemad, J. Jackel, J. Young, T. Banwell, B. E. Little, S. T. Chu, W. Chen, W. Chen, J. Hryniewicz, F. Johnson, D. Gill, O. King, R. Davidson, K. Donovan, and P. J. Delfyett, "Fully programmable ring-resonator-based integrated photonic circuit for phase coherent applications," *J. Lightwave Technol.* **24**, 77-87 (2006).
2. R. S. Tucker and J. L. Riding, "Optical ring-resonator random-access memories," *J. Lightwave Technol.* **26**, 320-328 (2008).
3. H.-S. Lee, G.-D. Kim, and S.-S. Lee, "Highly sensitive integrated photonic temperature sensor exploiting a polymeric microring resonator," *Hankook Kwanghak Hoeji (Korean J. Opt. Photon.)* **19**, 224-228 (2008).
4. G. N. Nielson, D. Seneviratne, F. Lopez-Royo, P. T. Rakich, Y. Avrahami, M. R. Watts, H. A. Haus, H. L. Tuller, and G. Barbastathis, "Integrated wavelength-selective optical MEMS switching using ring resonator filters," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17**, 1190-1192 (2005).
5. G. Griffel, "Synthesis of optical filters using ring resonator arrays," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **12**, 810-812 (2000).
6. H. Lee, G.-W. Kim, and Y.-C. Chung, "Hybrid-integrated tunable laser using polymer-ring resonator-based add/drop reflector and reflective semiconductor optical amplifier," *Korean J. Opt. Photon. (Hankook Kwanghak Hoeji)* **20**, 217-222 (2009).
7. G. Griffel, "Vernier effect in asymmetrical ring resonator array," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **12**, 1642-1644 (2000).
8. G. Barbarossa, A. M. Matteo, and M. N. Armenise, "Theoretical analysis of triple-coupler ring-based optical guided-wave resonator," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **13**, 148-157 (1995).
9. J. Poon, J. Scheuer, S. Mookherjea, G. Paloczi, Y. Huang, and A. Yariv, "Matrix analysis of microring coupled-resonator optical waveguide," *Opt. Express* **12**, 90-103 (2004).