폴리머 광공진기 라우터 기반의 4채널 선택 포토닉 마이크로웨이브 대역통과 필터

김건덕 · 어윤성 · 이상신†

광운대학교 전자공학과
㉾ 139-701 서울특별시 노원구 월계동 447-1

(2008년 4월 7일 받음, 2008년 5월 26일 수정본 받음, 2008년 5월 27일 게재 확정)

본 논문에서는 1×4 스위치와 서로 다른 FSR(free spectral ranges)을 갖는 마이크로링 공진기 배열을 결합하여 구현된 광공진기 라우터를 기반으로 하는 집적광학 방식의 4채널 선택 마이크로웨이브(microwave: MW) 필터를 제안하고 구현하였다. 중심 주파수는 링 공진기의 반지름에 따른 FSR에 의해 결정되며, 이를 통해 얻어지는 10 GHz, 16 GHz, 18 GHz, 20 GHz로 구성된 4개의 채널은 광스위치에 제어 전압을 인가하여 개별적으로 선택할 수 있었다.

주제어: Photonic microwave filter, Ring resonator, Optical resonator router, Channel selective filter, Reconfigurable

I. 서 론

광학적으로 RF(radio frequency) 및 마이크로웨이브(microwave: MW) 신호를 처리할 수 있는 기술이 무선통신과 광통신 기술이 결합된 RoF(radio over fiber) 시스템, MTI(moving target identification) 지상레이더 시스템, 위성통신 시스템, 위상배열 안테나, THz 신호처리 등의 다양한 분야에 응용되고 있다.[1] 또한 단일 플랫폼으로 집적되어 휴대폰, 무선랜, RFID, 위성통신 등의 무선통신 서비스를 동시에 제공할 수 있는 차세대 통합시스템은 경제성, 소형화, 저전력 등의 장점을 제공할 수 있으므로 많은 관심을 받고 있다.[2] 이러한 서로 다른 주파수 대역을 동시에 사용하는 차세대 통합시스템을 효과적으로 구현하기 위해서는 다중 채널을 전기적으로 선택할 수 있는 재구성형(reconfigurable) MW 대역통과 필터가 필수적이다.[3,4] 특히 집적광학 방식을 이용한 MW 대역통과 필터는 경량이고, 전자기간섭에 무관하며, 손실이 적은 장점들을 가지고 있어 많은 연구가 진행되고 있다. 최근에는 광링 공진기를 이용한 단일 채널 스위치 필터와 듀얼(dual) 채널 스위치 필터가 보고되었다.[5-10]

본 논문에서는 1×4 스위치와 서로 다른 FSR(free spectral range)를 갖는 마이크로링 공진기 필터 배열을 결합한 광공진기 라우터를 기반으로 하는 집적광학 방식의 4채널 선택 마이크로웨이브 필터를 제안하고 구현하였다. 제안된 MW 필터의 각 채널은 각각의 링 공진기의 FSR에 따른 주파수 대역을 광스위치에 제어 전압을 인가하여 개별적으로 선택할 수 있었다.

II. 제안된 필터의 동작원리 및 설계

제안된 4채널 스위치 MW 필터의 구조가 그림 1에 도시되어 있다. 이것은 광원(laser diode: LD), 전기광학 변조기(electrooptic modulator: EOM), 4개의 광 검출기(photodetector: PD), 그리고 광공진기 라우터로 구성되어 있다. 여기서 광공진기 라우터는 그림 2와 같이 4개의 서로 다른 반지름을 갖는 마이크로링 공진기 배열과 1×4 광스위치를 결합하여 구현된다. 각 링 공진기들은 FSR에 해당하는 주기를 갖는 주기적인 대역통과 특성을 나타내게 되며, 이때의 FSR은 링의 반지름에 반비례하는 값으로 주어진다.[5-10] 이 FSR은 공진기에 연결된 광스위치를 통해 선택할 수 있다.

제안된 MW 필터의 동작원리를 살펴보면 다음과 같다. 먼저 입력된 MW 신호는 변조기를 통해 광신호에 실리고, 이 변조된 광신호는 광스위치에 입력된 후에 제어 전압에 따라 4개의 링 공진기 포트 중 하나로 라우팅(routing)된다. 라우팅된 신호는 선택된 링 공진기의 FSR에 따라 선택적으로 필터링되고, 이 신호는 PD에서 앞에서 주어진 각 공진기의 FSR과 일치하는 중심주파수로 복원된다.[5,6] 예를 들어, 제어 전압 V_{c1}에 의해 포트 1이 on 상태가 되고 나머지 세 포트는 off 상태가 되면, MW 신호에 의해 변조된 입력 광 신호는 링 공진기 1만을 통과하게 된다. 그 결과 PD에서 복원되는

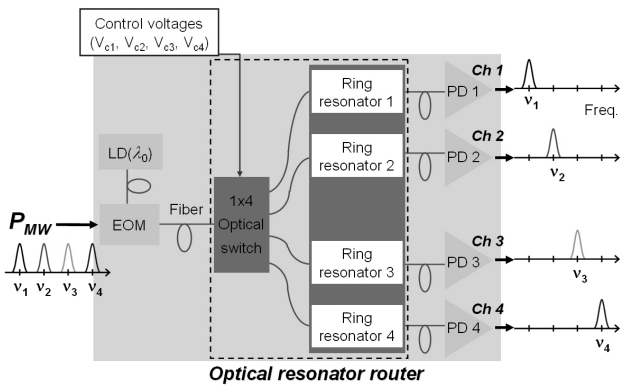

그림 1. 제안된 4채널 선택형 MW 필터 구조.

†E-mail: slee@kw.ac.kr

MW 대역통과 필터특성은 Ring1에 의한 FSR과 같은 중심 주파수의 채널(Channel: Ch) 1의 특성을 나타낸다. 이를 통해 다른 세 채널 Ch 2, Ch 3, Ch 4 또한 각각의 제어 전압 V_{c2}, V_{c3}, V_{c4}에 따라 비슷하게 동작하게 될 것을 알 수 있다. 결과적으로 제안된 소자는 4개의 서로 다른 채널을 전기적으로 선택 할 수 있는 필터로 동작하게 될 것으로 기대된다. 한편, 마이크로웨이브 필터의 대역폭은 링 공진기의 대역폭에 의해서 결정된다.[5,6]

제안된 필터를 구현하기 위해 필수적인 그림 2의 공진기 라우터에서, 링 공진기 배열은 다음과 같이 설계되었다. 기본적으로 실리콘 기판 위에 하부 클래딩, 코어, 상부 클래딩으로 구성되어 있는 배열된 링 공진기들은 단일 모드 전송을 위해 코어의 폭과 높이가 각각 5 μm와 4.5 μm로 설계되었다. 이때 도파로의 클래딩과 코어의 굴절률이 각각 1.46과 1.48으로 굴절률 차가 1.4%로 구성되었다. MW 필터에서 중심 주파수를 결정하는 4개의 공진기의 반지름은 각각 R_1 = 3.3 mm, R_2 = 2.0 mm, R_3 = 1.8 mm, R_4 = 1.65 mm의 반지름으로 설계되었으며, FSR은 각각 0.08 nm, 0.128 nm, 0.142 nm, 0.16 nm로 주어진다. 이를 통해 예상되는 중심주파수는 각각 10 GHz, 16 GHz, 18 GHz, 20 GHz이다.

III. 소자 제작 및 특성 측정

제안된 MW 필터 구현을 위한 링 공진기 배열은 PLC(planar lightwave circuit) 표준 공정을 도입하여 제작되었으며, 그림 3에 도시하였다. 제작 시 사용된 폴리머는 광스위치에 사용한 폴리머와 같은 종류의 물질로 선택하여 향후 하나의 칩으로 집적할 수 있도록 하였다. 먼저 실리콘 기판 위에 Chem Optics사의 폴리머 ZPU460(n = 1.460)을 스핀코팅하고 자외선 경화하여 ~10 μm 두께의 하부 클래딩을 형성하였다. 다음으로 하부 클래딩 위에 ZPU480(n = 1.480)을 스핀 코팅하고, 포토리소그래피 공정과 건식 식각 공정을 통하여 폭 5 μm, 높이 4.5 μm의 코어 도파로 패턴을 형성하였다. 그 위에 다시 ZPU460을 이용하여 ~10 μm 두께의 상부 클래딩을 형성하였고, 마지막으로 효과적인 광결합을 위해 소자의 입출력 단면을 절단(dicing)하여 소자를 완성하였다.

먼저 TE 편광의 파장가변 레이저(Agilent 8164B)를 이용하여 제작된 링 공진기형 필터의 광학적 특성을 조사하였다. 이를 통하여 그림 4와 같이 각 링의 반지름에 따라 결정된 FSR의 간격을 가지는 주기적인 공진 특성이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 측정된 각 링 공진기의 FSR은 Ring1일 때 0.08 nm(10 GHz), Ring2일 때 0.128 nm(16 GHz), Ring3일 때 0.142 nm(18 GHz), Ring4일 때 0.16 nm(20 GHz)였고, 각각의 3-dB 대역폭은 0.009 nm, 0.02 nm, 0.017 nm, 0.016 nm였다. 또한 각 공진기의 소멸비는 10 dB에서 17 dB 범위에서 측정됨을 알 수 있었다. 측정된 광학적 특성을 표 1에 나타내었으며, 각 채널에 해당하는 공진기의 대역폭과 소멸비가 각각 차이가 나는 것은 링 공진기에서의 광손실과 결합영역에서의 광결합 정도가 서로 다르기 때문인 것으로 사료

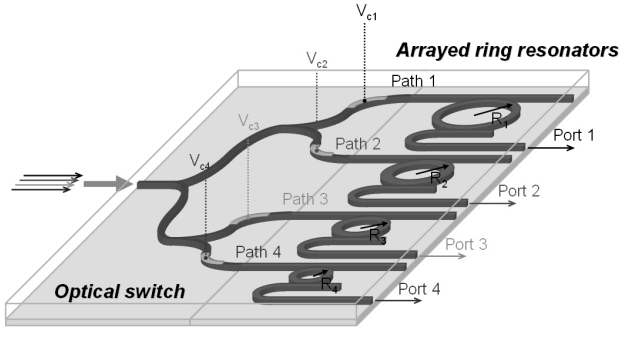

그림 2. 제안된 공진기 라우터.

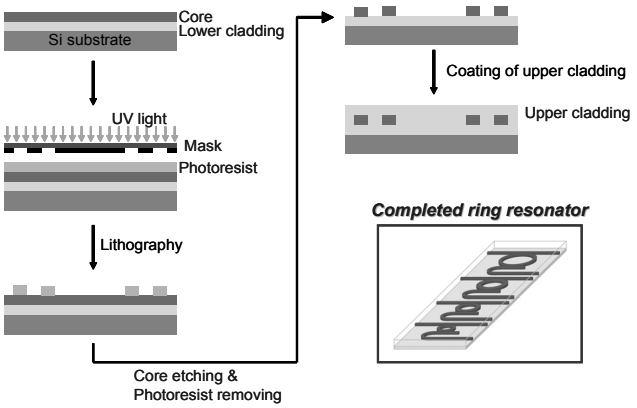

그림 3. 마이크로링 광공진기 배열의 제작과정.

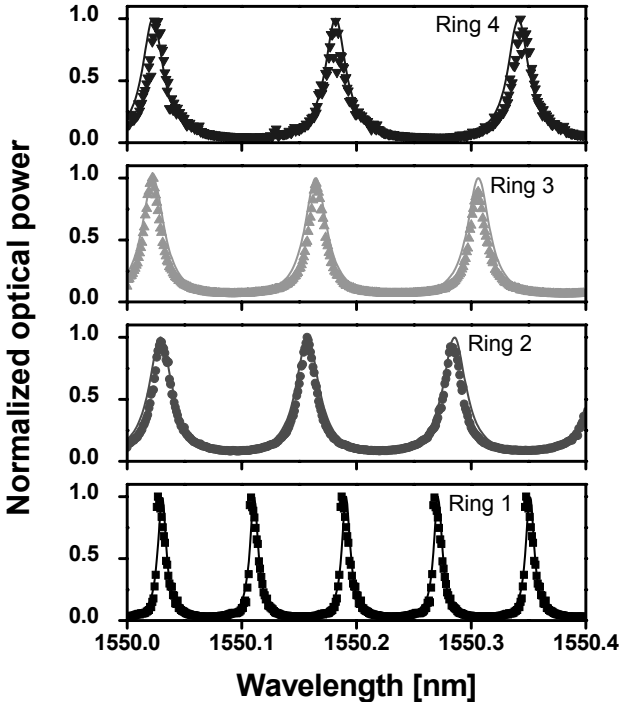

그림 4. 배열된 링 공진기의 측정된 광학특성(점선: 측정치, 실선: 이론치).

표 1. 채널에 따른 링 공진기의 광학적 성능 측정결과.

Parameters \ Channels	Ch 1	Ch 2	Ch 3	Ch 4
FSR [nm]	0.08	0.128	0.142	0.16
3-dB bandwidth [nm]	0.009	0.02	0.017	0.016
Extinction ratio [dB]	~15	~10	~13	~11

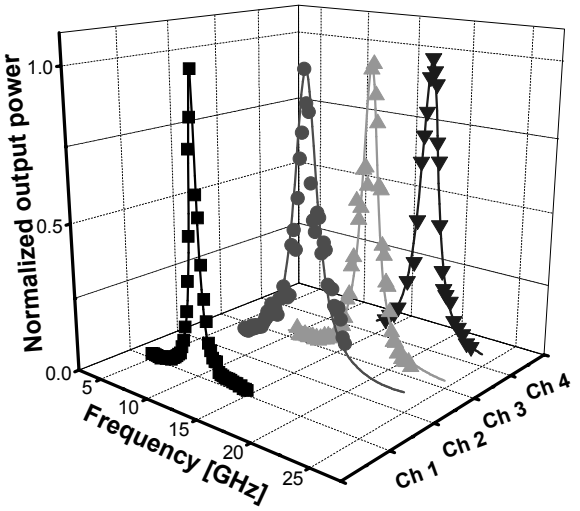

그림 5. 제안된 MW 필터의 전달특성(점선: 측정치, 실선: 이론치).

된다.[5,6] 또한, 전달함수방법으로 계산된 이론적인 전달특성을 그림 4에 실선으로 삽입하였으며 실험결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있었다.[5-10]

다음으로 제작된 채널 선택형 MW 필터의 특성은 다음과 같은 측정장비를 이용하여 측정하였다. 신호발생기에서 인가된 MW 신호는 변조기에서 광신호에 변조되고, 광공진기 라우터에서 필터링 된 신호는 광검출기를 통해 복조되며, 출력은 스펙트럼 분석기에 의해 얻어졌다. 여기서 사용된 광검출기들의 대역폭은 ~12 GHz에서 ~25 GHz였고, 1550.0 nm 대역의 광원을 사용하였으며, 이때 광원의 유효 선폭은 ~50 MHz였다. 그림 5는 각각의 채널을 전기적으로 선택했을 때의 출력특성을 보여주며, 점선은 실험을 통해 측정된 결과를 나타내고, 실선은 이론적으로 계산한 결과를 나타낸다. 먼저 제어전압 V_{c1}이 스위치에 인가되고 나머지 제어전압을 off하면, 통과대역의 중심주파수가 10 GHz인 Ch 1이 선택되어 동작하였다. 이때의 소멸비는 15 dB였고, 3-dB 대역폭은 1 GHz였으며, 이를 통해 계산된 Q-factor는 10이었다. 이와 유사하게 나머지 세 개의 다른 채널 또한 각 제어전압에 따라 Ch 2에서 16 GHz, Ch 3에서 18 GHz, 그리고 Ch 4에서 20 GHz의 대역통과 특성을 나타내었다. 이에 대한 측정 결과를 표 2에 나타내었으며, 중심주파수, Q-factor, 소멸비 등의 주요 성능에 관련된 특성들을 정리하였다. 표 2에 나타난 것과 같이 각 채널의 Q-factor는 8~10이었고, 소멸비는 10 dB에서 17 dB였다. 각 채널을 선택하기 위해 필요한 스위치의 제어

표 2. 제안된 MW 필터의 성능 측정결과.

Parameters \ Channels	Ch 1	Ch 2	Ch 3	Ch 4
Center frequency [GHz]	10	16	18	20
Quality factor	10	8	10	10
Extinction ratio [dB]	~17	~10	~15	~12

전압은 5 V였다. 특히, 포토닉 마이크로웨이브 필터의 대역폭과 소멸비는 각 링 광공진기의 대역폭과 소멸비와 거의 동일하게 얻어짐을 알 수 있었다.[5,6] 그리고 채널을 스위칭 할 때 걸리는 시간은 5 ms 이하였다.[11] 한편, 제작된 마이크로웨이브 필터의 각 채널 간의 crosstalk는 약 4 dB 이상이었으며, 이는 링 광공진기에서의 손실이 크기 때문이었다. 따라서 이를 해결하기 위해서는 링 광공진기에서의 손실을 줄여 Q-factor를 향상시키고, 마이크로웨이브 필터에서의 각 채널의 Q-factor를 향상시킴으로 해결할 수 있을 것으로 사료된다.

결과적으로 구현된 소자는 스위치의 포트 수와 배열된 링 공진기의 수를 늘리는 것을 통해 더 많은 채널로 확장할 수 있음을 확인할 수 있었다. 게다가 공진기 라우터는 궁극적으로 하나의 플랫폼에 광원, 전기광학변조기, 광검출기와 집적되어 하나의 모듈로 동작이 가능하다. 마지막으로 MW 필터의 각 출력 단을 파워 결합기로 연결하면, MW 필터 뱅크로도 사용이 가능하다.[4]

IV. 결 론

본 논문에서는 1×4 스위치와 서로 다른 FSR을 갖는 링 공진기 필터 배열을 결합한 공진기 라우터를 기반으로 하는 집적광학 방식의 4채널 선택 마이크로웨이브 필터를 제안하고 구현하였다. 4개의 채널의 중심 주파수는 각각 채널 1은 10 GHz, 채널 2는 16 GHz, 채널 3은 18 GHz, 채널 4는 20 GHz였으며, 제어 전압을 인가하여 개별적으로 선택할 수 있었다. 이를 확장하여 차세대 통합시스템의 핵심 요소인 다중 채널 선택형 MW 필터를 효과적으로 구현할 수 있을 것으로 기대되며, 궁극적으로는 집적광학 MW 필터 뱅크로 활용할 수 있을 것으로 예상된다.

감사의 글

본 논문은 2006년도 「서울시 산학연 협력사업」의 「나노 IP/SoC 설계기술혁신 사업단」의 지원과 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2007-D00195-I01041).

참고문헌

[1] J. Capmany, D. Paster, B. Ortega, J. Mora, and M. Andres, "Photonic processing of microwave signals," *IEE Proc.*

Optoelectron., vol. 152, pp. 299-320, 2005.
[2] H. H. Chen and M. Guizani, *Next generation wireless systems and networks*. West Sussex: Wiley, 2006.
[3] D. Pastor, B. Ortega, J. Capmany, P. Y. Fonjallaz, and M. Popov, "Tunable microwave photonic filter for noise and interference suppression in UMTS base stations," *Electron. Lett*., vol. 40, no. 16, pp. 997-999, 2004.
[4] S. F. Peik, B. Jolley, and R. R. Mansour, "Switched superconductive filter-banks," *2004 IEEE MTT-S Digest*, pp. 131-134, 2004, paper TU6A-3.
[5] W. J. Chin, D. H. Kim, J. H. Song, and S. S. Lee, "Integrated photonic microwave bandpass filter incorporating a polymeric microring resonator," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 45, no. 4A, pp. 2576-2579, 2006.
[6] 진원준, 김도환, 송주한, 이상신, "폴리머 마이크로링 공진기를 이용한 광학적 마이크로웨이브 대역통과 필터," *한국광학회지*, 제16권 제5호, pp. 469-475, 2005.
[7] G. D. Kim and S. S. Lee, "Photonic microwave reconfigurable filter based on a tunable polymeric ring resonator with electrically variable response," *Opt. Comm*., vol. 278, pp. 303-306, 2007.
[8] 김건덕, 이상신, "전기적으로 가변되는 전달특성을 갖는 폴리머 링 광공진기를 이용한 마이크로웨이브 대역통과 필터," *한국광학회지*, 제17권 제5호, pp. 475-479, 2006.
[9] G. D. Kim and S. S. Lee, "Photonic microwave channel selective filter incorporating a thermooptic switch based on tunable ring resonators," *IEEE Photon. Technol. Lett*., vol. 19, no. 13, pp. 1008-1010, 2007.
[10] 김건덕, 이상신, "폴리머 링 공진기 기반의 스위치를 이용한 집적광학 채널 선택 마이크로웨이브 대역통과 필터," *한국광학회지*, 제18권 제1호, pp. 79-83, 2007.
[11] Y. O. Noh, J. M. Kim, M. S. Yang, H. J. Choi, H. J. Lee, Y. H. Won, and S. G. Han, "Thermooptic 2×2 asymmetric digital optical switches with zero-voltage operation state," *IEEE Photon. Technol. Lett*., vol. 16, no. 2, pp. 446-48, 2004.

Four-channel Selective Photonic Microwave Filter Based on Optical Resonator Router

Gun-Duk Kim, Yun-Sung Eo, and Sang-Shin Lee†

Department of Electronic Engineering, Kwangwoon University, 447-1 Wolgye-Dong, Nowon-Gu, Seoul 139-701, South Korea

†*E-mail: slee@kw.ac.kr*

(Received April 7, 2008; Revised manuscript May 26, 2008; Accepted May 27, 2008)

A four-channel selective microwave filter was demonstrated incorporating an optical resonator router, which is constructed by integrating a 1×4 space switch with an arrayed ring filters featuring different free spectral ranges. The center frequency of each channel was determined by the FSR of the corresponding ring resonator, and the four channels centered at 10 GHz, 16 GHz, 18 GHz and 20 GHz were individually selected to provide a bandpass filtering via the control voltage applied to the switched resonator.

OCIS codes: (230.5750) Resonators; (250.5460) Polymer waveguides-fibers; (350.4010) Microwaves.