

전기적으로 가변되는 전달특성을 갖는 폴리머 링 광공진기를 이용한 마이크로웨이브 대역통과 필터

김건덕 · 이상신[†]

광운대학교 전자공학과

☎ 139-701 서울특별시 노원구 월계동 447-1

(2006년 9월 11일 받음, 2006년 10월 13일 수정본 받음)

본 논문에서는 폴리머 링 광공진기를 이용하여 집적광학형 K-band용 마이크로웨이브 대역통과 필터를 제안하고 구현하였다. 특히, 열광학 효과를 이용하여 광공진기의 공진파장을 변화시킴으로써 대역통과 필터의 전달특성을 전기적으로 조절하였다. 측정된 필터의 중심주파수는 20 GHz, 소멸비는 약 15 dB, 3 dB 대역폭은 2 GHz, 그리고 Q값은 10이었다. 마이크로웨이브 필터에서 중심주파수의 출력특성을 27 dB범위 내에서 ~6.7 dB/mW로 조절할 수 있었다. 전기적으로 조절되는 전달특성을 갖는 이 필터는 마이크로웨이브 스위치 등으로 응용할 수 있을 것으로 기대된다.

주제어 : Photonic microwave filter, Ring resonator, Polymer waveguide, Thermo-optic effect, Passband shaping.

I 서 론

최근에 광학적으로 RF(radio frequency) 및 마이크로웨이브(MW: microwave) 신호를 처리할 수 있는 기술이 광통신과 무선통신 기술이 결합된 RoF(radio over fiber)시스템, MTI(moving target identification) 지상레이더 시스템, 위성통신 시스템, 위상배열 안테나, THz 신호처리 등의 다양한 분야에 응용되어 왔다.^[1,2] 이러한 응용 분야의 핵심 요소 중의 하나가 광학적 방식의 MW 대역통과 필터이며, 이것의 기능으로는 잡음 제거 및 감소, 채널 간의 간섭 제거 등이 있다. 이 광학적 필터는 기존의 전기적 방식에 비해 경량, 전자기 간섭에 무관, 적은 입력손실 등의 장점을 갖고 있다.^[3-9]

지금까지 광학적 MW 필터는 광섬유 지연선로^[4,5], 광섬유 브래그 격자(fiber Bragg gratings)^[6-9], 도파로 소자^[10] 등을 이용하여 주로 구현되었다. 이들 중에서 링 공진기 기반의 집적광학 소자를 이용한 방식은 광섬유 소자에 비해 안정적이고 정밀한 특성제어가 가능하고, 다른 소자와의 집적성이 용이하다는 장점을 갖고 있다. 또한, 폴리머를 이용한 집적광학 소자는 제작공정이 간단하고 가격이 저렴하여 대량생산에 유리하다. 따라서 본 논문에서는 폴리머 링 광공진기 기반의 전기적으로 전달특성이 가변되는 광학적 방식의 K-band(20 GHz)용 MW 대역통과 필터를 제안하고 구현하였다. 먼저 폴리머 도파로를 이용한 광공진기는 최종 필터의 중심주파수와 동일한 FSR(free spectral range)을 갖도록 설계되었으며, 입력된 MW 신호에 의해 변조된 광신호를 선택적으로 통과시키는 역할을 한다. 그리고 폴리머 광공진기 위에 형성된 전극에 전력을 인가함으로써 열광학 효과를 통하여

MW 대역통과 필터의 전달특성을 전기적으로 조절하였다. 이러한 소자는 MW 스위치 등으로도 효과적으로 응용될 수 있을 것이다.^[11]

II 제안된 필터의 동작 원리 및 설계

제안된 광학적 MW 대역통과 필터의 구조가 그림 1에 도시되어 있다. 이것은 광원(LD: laser diode), 전기광학 변조기(EOM: electrooptic modulator), 링 광공진기, 그리고 광검출기(PD: photodetector)로 구성되어 있다. 입력 광신호는 전기광학 변조기에 인가되는 MW 신호에 의해 변조된다. 이 변조된 광신호는 링 광공진기를 통과하면서 선택적으로 필터링된 후 광검출기에 의해 검출되어 최종적으로 MW 신호가 얻어진다.

먼저, 광학적 MW 대역통과 필터의 동작원리를 살펴보면 다음과 같다. 캐리어 광신호의 주파수와 MW 신호를 각각 ω_0 와 ω_m 이라고 가정하자. 변조된 광신호는 중심주파수 ω_0 와 harmonic sideband 주파수 ($\omega_0 \pm \omega_m, \omega_0 \pm 2\omega_m, \dots$) 성분으로 구성된다. 이 신호가 링 광공진기를 통과하면, 광공진기의 중심주파수와 이로부터 FSR만큼 떨어져 있는 주파수 성분들만 주로 통과되어 검출된다. 사용되는 광검출기의 대역폭을 ω_m 근처라고 가정하면, 고차의 harmonic sideband 성분은 차단된다. 기본적으로 광검출기는 저대역 통과 필터의 역할을 하므로, 최종적인 출력은 캐리어 광신호가 제거된 MW 신호 주파수 성분 ω_m 만 남게 되고, MW 신호의 출력세기는 $P_{out} \propto 16(a_0 a_{+1})(a_0 a_{-1})$ 로 주어진다. 여기서 a_0 는 중심주파수 ω_0 의 필드 크기이고, $a_{\pm 1}$ 은 첫번째 harmonic sideband 주파수 $\omega_0 \pm \omega_m$ 에 해당되는 필드 크기를 나타낸다. 그림 2에

[†] E-mail: slee@kw.ac.kr

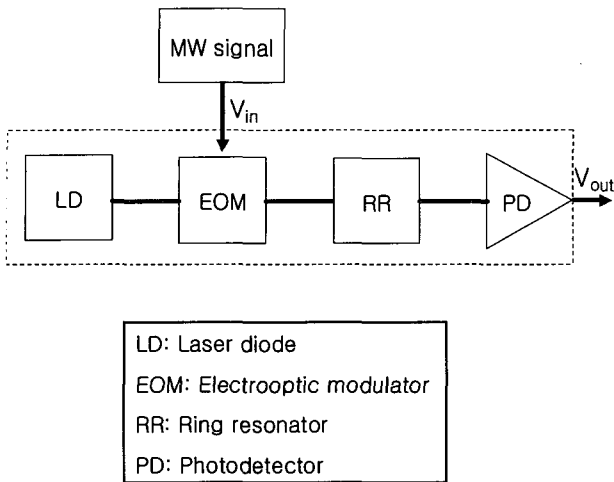


그림 1. 제안된 MW 대역통과 필터의 구조.

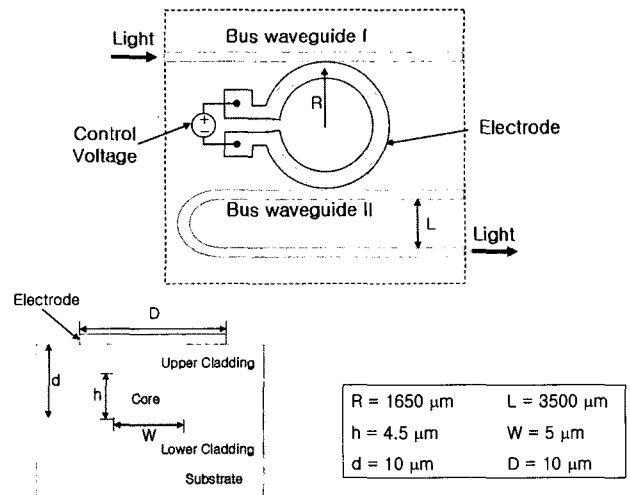


그림 3. 제안된 폴리머 링 광공진기의 구조.

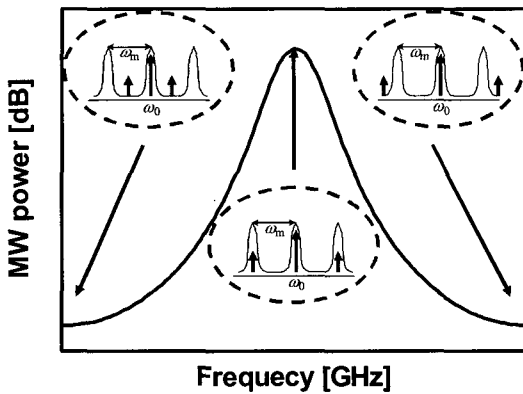


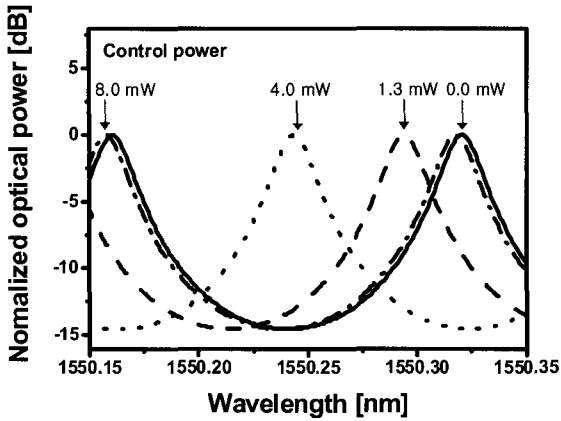
그림 2. 제안된 소자의 동작원리.

도시된 것처럼 광공진기의 중심주파수와 캐리어 광신호의 주파수가 ω_0 로 같고, 입력되는 MW 신호의 주파수가 광공진기의 FSR과 동일하다면 MW 신호의 출력세기가 최대가 된다. 반면에 MW 신호의 주파수가 광공진기의 FSR 보다 작거나 큰 경우에는 링 광공진기의 주기적인 대역통과 필터 특성에 의하여 $a_{\pm 1}$ 값이 감소되어 MW 신호의 출력세기는 현저히 감소하게 된다. 따라서 링 광공진기의 FSR에 해당되는 MW 주파수 성분만 통과되는 MW 대역통과 필터의 특성을 얻을 수 있다.

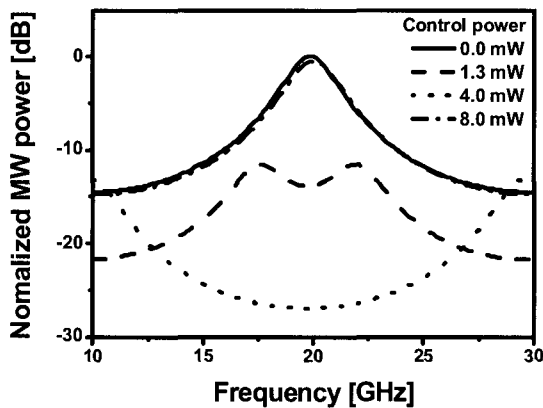
제안된 광학적 대역통과 필터에 사용되는 링 광공진기의 구조가 그림 3에 도시되어 있다. 이것은 링 도파로, 버스 도파로 I과 II, 그리고 전극으로 구성되어 있다. 광신호가 버스 I로 입력되면 광파워의 일부가 링 도파로로 결합되며, 이것이 링 도파로를 진행하면서 버스 II로 결합되어 출력된다. 전체적으로 광공진기의 출력은 공진주파수에서 최대가 되는 주기적인 대역통과 특성을 갖는다. 이 때, 인접한 공진주파수 간의 간격은 $FSR = \frac{c_0}{n_{eff}2\pi R}$ 로 주어진다. 여기서 c_0 는

진공 중에서의 빛의 속도, n_{eff} 는 링 도파로의 유효굴절률, R 은 링의 반지름이다. 본 논문에서는 전달매트릭스(transfer matrix) 방법을 이용하여 링 광공진기의 특성을 해석하였다 [12]. 그림 3에서 알 수 있듯이, 설계된 폴리머 링 광공진기의 단면 구조는 하부 클래딩, 코어, 상부 클래딩으로 구성되어 있다. 설계된 도파로의 폭과 높이는 각각 5 μm와 4.5 μm이고, 링의 반지름은 1.65 mm, 결합영역에서의 버스 와 링 도파로 간의 간격은 1 μm, 전극의 폭은 10 μm이다. 코어와 클래딩의 굴절률은 각각 1.45와 1.43이며, 해당하는 굴절률 차 $\Delta n = 1.4\%$ 이다. 설계된 광공진기의 FSR은 20 GHz(또는 0.16 nm)이다.

다음으로 폴리머 광공진기의 공진주파수(공진파장)를 열광학 효과를 이용하여 이동시킴으로써 MW 대역통과 필터의 전달특성을 전기적으로 조절하는 방법에 관하여 살펴보면 다음과 같다. 전극에 인가된 전력에 의해 폴리머 도파로의 유효굴절률이 감소되어 광공진기의 공진주파수가 변하게 된다. MW 신호가 실린 광신호가 링 광공진기를 통과할 때, 캐리어 광신호의 주파수와 링 광공진기의 중심주파수가 ω_0 로 일치하면 최대 출력파워가 출력된다. 반면에 광공진기의 중심주파수가 이동되어 캐리어 광신호의 주파수와 어긋나게 되면 출력파워는 점차 감소한다. 즉, FSR/2만큼 변이된 지점에서 출력파워 최소가 되며, FSR만큼 변이되면 다시 출력파워가 최대가 된다. 그림 4(a)는 제어 전력이 0~8 mW 범위에서 가변될 때 링 광공진기의 공진파장이 거의 FSR=0.16 nm만큼 이동됨을 이론적으로 보여주고 있다. 그림 4(b)는 이에 따른 MW 필터의 계산된 전달특성 변화를 보여준다. 예상대로 전력이 증가함에 따라 통과대역에서 MW 출력이 점진적으로 감소하며, 광공진기의 중심 파장이 FSR/2만큼 변이될 때 출력이 최소가 되고, FSR만큼 변이될 때 최초의 특성이 다시 얻어짐을 알 수 있다. 한편, MW 필터의 중심주파수는 링 공진기의 FSR에 의해 결정된다. 열광학 효과에 의한 링 공진기의 FSR 변화는 공진기의 공진주파수 변화에 비해서는



(a)



(b)

그림 4. 제어 전력에 따른 전달특성 변화.

- (a) 링 광공진기의 계산된 전달특성 변화.
- (b) MW 대역통과 필터의 계산된 전달특성 변화.

무시할만큼 작다. 따라서 열광학 효과에 의한 MW 대역통과 필터의 중심주파수 변화는 거의 없을 것으로 사료된다.

III. 소자 제작 및 특성 측정

폴리머 링 광공진기를 구현하기 위하여 PLC(planar light-wave circuit) 제작용 표준 공정을 도입하였다. 먼저 ChemOptics사의 폴리머 ZPU430을 스핀코팅(1000 rpm, 30초) 하고 자외선 경화하여 약 10 μm 두께의 하부 클래딩을 형성하였고, ZPU450을 사용하여 동일한 공정으로(1500 rpm, 30초) 약 4.5 μm 두께의 코어를 형성하였다. 다음으로 포토리소그래피 공정과 ICP를 이용한 건식 식각 공정을 통하여 코어에 도파로 패턴을 형성하였고 그 위에 하부 클래딩과 동일한 조건을 이용하여 약 10 μm 두께의 상부 클래딩을 형성하였다. 마지막으로 리소그래피와 선택적인 식각공정을 이용하여 금 박막 전극을 형성하고, 효과적인 광 결합을 위해 소자의 입출력 단면을 다이싱(dicing) 하여 완성하였다.

제작된 링 광공진기의 광학적 특성을 먼저 측정하기 위하

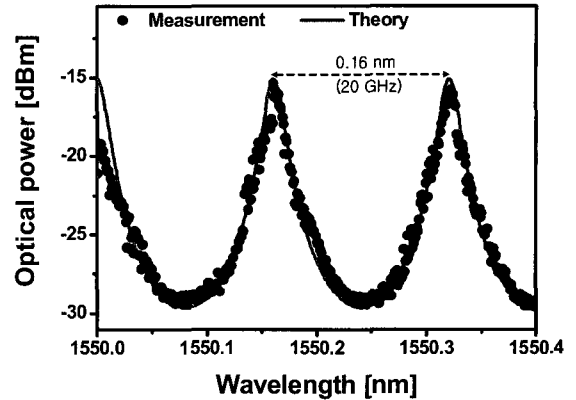


그림 5. 측정된 링 광공진기의 전달특성.

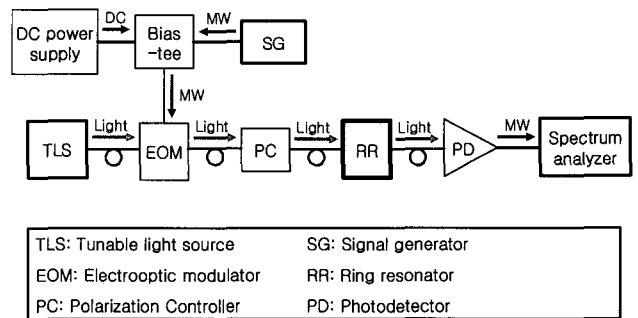


그림 6. 측정 장치.

여, TLS(tunable light source)에서 출력된 광신호를 편광조정기를 거쳐 제작된 링 광공진기에 입사시킨 후 소자의 출력을 광파워미터를 사용하여 측정하였다. 그림 5는 측정된 링 광공진기의 광학적 특성을 보여준다. 공진파장은 1550 nm 대역이며, FSR은 0.16 nm(20 GHz), 소멸비는 ~15 dB였다. 그리고 3 dB 대역폭은 0.016 nm(2 GHz)였고, 이를 통해 계산된 Q값은 $\sim 9.7 \times 10^4$ 이었다.

제작된 MW 필터의 전달특성을 측정하기 위한 장치가 그림 6에 도시되어 있다. 신호발생기에서 출력된 MW 신호는 Bias-Tee를 통해 전기광학 변조기에 입력된다. TLS에서 출력된 중심파장이 1550 nm인 캐리어 광신호는 전기광학 변조기에 입력되어 MW 신호에 의해 변조되어 출력된다. 이 변조된 광신호는 링 광공진기를 통과하여 필터링된 후 광검출기에 입력된다. 이 때 광검출기의 최소 출력 한계를 고려하여 광증폭기(EDFA: erbium doped fiber amplifier)를 광공진기 앞에 사용하였으며, 광검출기의 출력 MW 신호를 스펙트럼분석기를 이용하여 측정하였다. 그림 7은 측정된 MW 필터의 응답 특성을 나타낸다. 예상대로 중심주파수는 20 GHz였고, 소멸비는 약 15 dB였다. 그리고 3 dB 대역폭은 2 GHz였고, 이를 통해 계산된 Q값은 10이었다. 기본적으로 MW 필터의 대역통과 특성은 링 공진기의 대역통과 특성에 의하여 결정된다. 링 공진기의 대역폭은 다중의 링 공진기를 cascading 하거나, 공진기의 도파로 손실을 줄이고 링과 버스 도파로 사이의 결합계수를 최적화 함으로써 줄일 수 있다

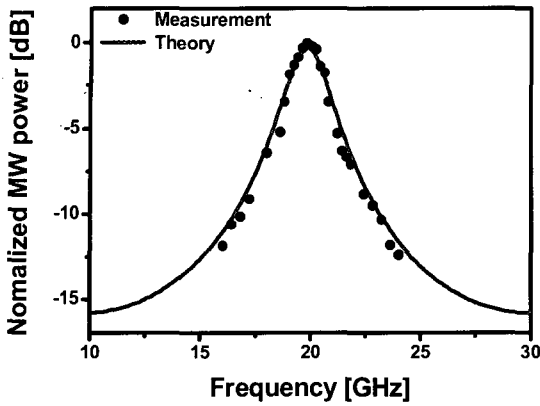


그림 7. 측정된 MW 대역통과 필터의 전달특성.

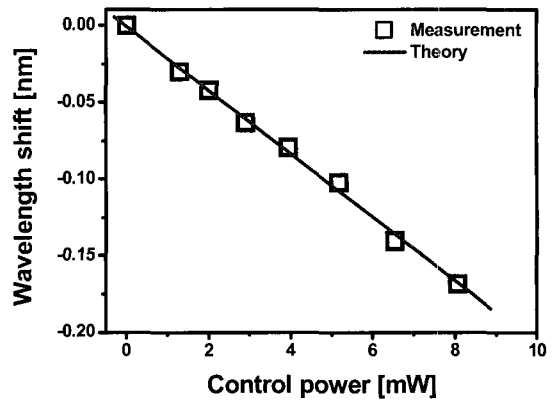


그림 9. 전극에 인가된 전력에 따른 중심파장의 변화율.

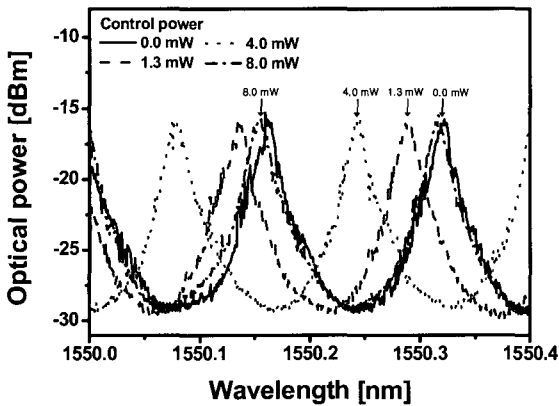


그림 8. 전극에 인가된 제어 전력에 따른 링 광공진기의 중심파장 변화.

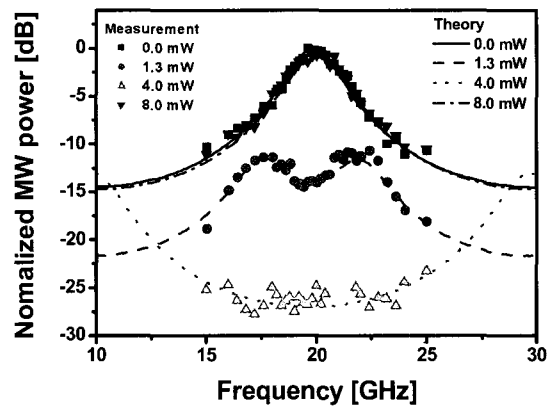


그림 10. 전극에 인가된 제어 전력에 따른 MW 대역통과 필터의 전달특성.

[10,13]. 따라서 이를 통해 MW 필터의 Q값을 향상시킬 수 있을 것으로 예상된다. 한편, 제안된 MW 대역통과 필터의 중심주파수 대역은 폴리머 링 광공진기의 직경을 변화시킴으로써 용이하게 변화시킬 수 있을 것이다.^[10] 그러나 주파수가 증가함에 따라 분산의 영향으로 인하여 중심 주파수를 향상시키는데 한계가 있을 것으로 예상된다.

다음으로 전극에 인가된 제어 전력에 대한 MW 필터의 전달특성 변화를 관찰하였다. 그림 8에는 제어 전력을 0에서 8.0 mW까지 변화시킬 경우, 제어 전력에 따른 링 광공진기의 전달특성 변화가 도시되어 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 전력이 증가함에 따라 공진파장의 위치가 단파장 쪽으로 이동됨을 알 수 있다. 그림 9에는 전력에 따른 광공진기 공진파장의 변화가 나타나 있는데, 측정된 변화율은 약 -0.02 nm/mW 이다. 그림 10에는 인가된 제어 전력에 따른 MW 필터의 대역통과 특성 변화에 대한 측정결과가 도시되어 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 인가된 제어 전력이 0 mW일 때의 초기 전달특성을 나타내고, 1.3 mW 전력이 인가된 경우에 통과대역의 출력이 감소하며, 인가 전력이 4 mW인 경우에는 출력이 최소가 됨을 알 수 있다. 또한 제어 전력을 점차 높여서 링 광공진기의 공진파장을 FSR만큼 이동시켰을 경우에 MW 대역통과 필터의 전달특성이 거의 초기의 전달특성

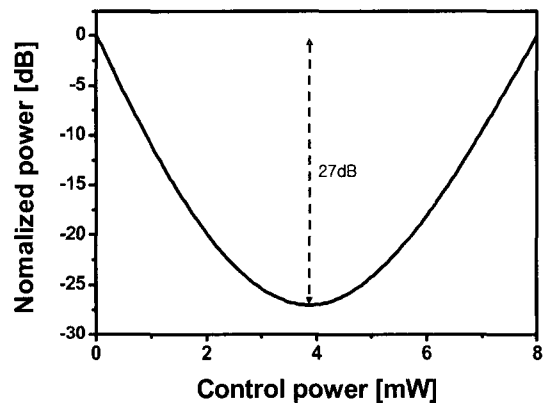


그림 11. 제어 전력에 따른 MW 필터의 통과 대역 중심주파수의 최대 출력 변화.

과 같아짐을 알 수 있다. 이 결과로부터 측정결과와 이론이 잘 일치함을 알 수 있다. 그림 11에는 제어 전력에 따른 MW 필터의 통과대역의 최대 출력의 변화가 도시되어 있다. 전력에 따른 출력변화 효율은 $\sim 6.7 \text{ dB/mW}$, 범위는 27 dB임을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 폴리머 링 광공진기를 이용하여 전기적으로 전달특성이 조절되는 MW 대역통과 필터를 제안하고 구현하였다. 얻어진 MW 대역통과 필터의 중심주파수는 20 GHz (K-band), 소멸비는 ~15 dB, Q값은 10이었다. 폴리머의 열광학 효과를 활용하여 MW 대역통과 필터의 출력을 27 dB 범위에서 ~6.7 dB/mW 효율로 조절하는데 성공하였다. 구현된 소자는 MW 대역통과 필터뿐만 아니라 MW 스위치 등으로 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 2006년도 「서울시 산학연 협력사업」의 「나노 IP/SoC 설계기술혁신 사업단」의 지원과 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITA-2006-(C1090-0603-0008)).

참고문헌

[1] A. Seeds, "Microwave photonics," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 50, pp. 877-887, 2002.
 [2] J. Capmany, D. Pastor, B. Ortega, J. Mora, and M. Andres, "Photonic processing of microwave signals," *IEEE Proc. Optoelectron.*, vol. 152, pp. 299-320, 2005.
 [3] J. Capmany, B. Ortega, and D. Pastor, "A tutorial on microwave photonic filters," *J. Lightwave Technol.*, vol. 24, no. 1, pp. 201-229, 2006.
 [4] M. Y. Frankel and R. D. Esman, "Fiber-optic tunable microwave transversal filter," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 7, no. 2, pp. 191-193, 1995.

[5] B. Vidal, V. Polo, J. L. Corral, and J. Marti, "Efficient architecture for WDM photonic microwave filters," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 16, no. 12, pp. 257-259, 2004.
 [6] D. B. Hunter and R. A. Minasian, "Tunable microwave fiber-optic bandpass filters," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, no. 7, pp. 874-876, 1999.
 [7] D. B. Hunter and R. A. Minasian, "Microwave optical filters using in-fiber Bragg grating arrays," *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, vol. 6, no. 2, pp. 103-105, 1996.
 [8] D. B. Hunter and R. A. Minasian, "Photonic signal processing of microwave signals using an active-fiber Bragg-grating-pair structure," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 45, no. 8, pp. 1463-1466, 1997.
 [9] F. Zeng and J. Yao, "All-optical microwave mixing and bandpass filtering in a radio-over-fiber link," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 17, no. 4, pp. 899-901, 2005.
 [10] 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.
 [11] K. Chang and L. H. Hsieh, "Microwave ring circuits and related structures," *Wiley*, Ch.5, 2004.
 [12] A. Yariv, "Universal relations for coupling of optical power between microresonators and dielectric waveguides," *Electron. Lett.*, vol. 36, no. 4, pp. 321-322, 2000.
 [13] D. H. Kim, J. G. Im, S. S. Lee, S. W. Ahn, and K. D. Lee, "Polymeric microring resonator using nanoimprint technique based on a stamp incorporating a smoothing buffer layer," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 17, no. 11, pp. 2352-2354, 2005.

Photonic K-Band Microwave Bandpass Filter with Electrically Controllable Transfer Characteristics Based on a Polymeric Ring Resonator

Gun-Duk Kim, 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 September 11, 2006, Revised manuscript October 13, 2006)

An integrated photonic K-band microwave bandpass filter has been proposed and demonstrated by incorporating a polymeric ring resonator. Its transfer characteristics were adjusted by shifting the resonance wavelength of the ring resonator via the thermo-optic effect. The achieved performance of the filter includes the center frequency of 20 GHz, the attenuation of ~15 dB, the bandwidth of 2 GHz, and the corresponding quality factor of 10. The microwave output power within the passband of the device was adjusted at the rate of about 6.7 dB/mW in the range of 27 dB. This kind of device with electrically controllable transfer characteristics can be applied to implement microwave switches and other devices.