

High-reflectivity Tunable Wavelength Filters Incorporating an Apodized Bragg Grating with a High-refractive-index Polymer Layer

Eon-Tae Kim, Tae-Hyun Park, Guanghao Huang, and Min-Cheol Oh[†]

*Department of Electronics Engineering, Pusan National University,
2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea*

(Received July 27, 2017; Revised September 26, 2017; Accepted November 16, 2017)

A tunable filter incorporating an apodized grating with a high-refractive-index polymer layer is demonstrated. In the apodized tunable filter, the reflectivity is decreased compared to that of a uniform grating, because of the gradually decreased grating depth. To increase the reflectivity of the apodized grating, a polymer of high refractive index is adopted for the apodized grating, and then high reflectivity is obtained while maintaining a narrow bandwidth. The apodized tunable filter exhibits a 3-dB bandwidth of 0.51 nm and a 20-dB bandwidth of 1.05 nm, with 98.5% reflection.

Keywords: Integrated optics, Optical waveguide, Wavelength filter, Polymer device

OCIS codes: (130.5460) Polymer waveguides; (130.3120) Integrated optics devices; (130. 7408) Wavelength filtering device

고굴절률 폴리머층과 에포다이즈드 브래그 격자를 이용한 고반사 파장 필터

김언태 · 박태현 · 황광호 · 오민철[†]

부산대학교 전자공학과 나노바이오광소자연구실
Ⓞ 46241 부산광역시 금정구 부산대학로63번길 2

(2017년 7월 27일 받음, 2017년 9월 26일 수정본 받음, 2017년 11월 16일 게재 확정)

본 논문에서는 고굴절률 폴리머와 에포다이즈드 격자를 이용한 파장가변필터를 구현하였다. 기존의 에포다이즈드 브래그 격자는 격자의 깊이가 감소하는 부분이 있기 때문에 균일 분포 브래그 격자와 비교하였을 때 반사율이 낮아지게 된다. 이와 같은 문제점을 개선하기 위해서 에포다이즈드 격자 층에 고굴절률 폴리머를 삽입하면 좁은 대역폭을 유지하면서 높은 반사율을 얻을 수 있다. 제작된 파장 가변 필터의 반사율은 98.5%이며, 3-dB와 20-dB 대역폭은 각각 0.51 nm, 1.05 nm 이다.

Keywords: 집적 광학, 광도파로, 파장 필터, 폴리머 디바이스

OCIS codes: (130.5460) Polymer waveguides; (130.3120) Integrated optics devices; (130. 7408) Wavelength filtering device

I. 서 론

현대인들의 일상생활을 통하여 디지털 데이터의 용량은 나날이 늘어만 가고 있으며, 디지털 데이터의 보관과 효율적인 활용을 위해서는 대용량의 데이터를 빠른 속도로 전송할 수 있는 광통신에 대한 성능 개선이 지속적으로 요구된다. WDM (wavelength division multiplexing) 광통신 시스템은 하나의 광섬유를 통하여 여러 파장으로 변조된 광신호들을 한꺼번에 전송하고, 수신단에서는 사용자가 원하는 광파장 신호만을 추출하여 사용하는 방식이다. 파장가변필터는 이러한 WDM 광통신 시스템에서 특정 파장 신호를 선택하여 추출하기 위

해서 반드시 필요한 소자이다¹⁾. 파장가변필터는 Cascaded MZI (Mach-Zehnder Interferometer)^{2,3)}, Side polished fiber tunable filter^{4,5)}, Fabry-Perot⁶⁻⁸⁾ 간섭계 등과 같은 다양한 원리를 이용하여 연구되어져 왔다. 기존 기술에 비하여 폴리머 기반 브래그 격자 파장가변필터는 FSR이 무한대이고 폴리머의 높은 열 광학계수를 이용하여 넓은 파장 가변 범위를 얻을 수 있기 때문에 WDM 광통신 시스템용 파장필터로서 최적의 성능을 보일 수 있다^{9,10)}.

일반적으로 브래그 격자는 반사율의 증가에 따라 반사 스펙트럼의 대역폭이 넓어지고 이로 인해 인접 채널간의 crosstalk을 발생시키는 원인이 된다. 반사스펙트럼의 대역폭을 좁게

[†]E-mail: mincheoloh@pusan.ac.kr, ORCID: 0000-0002-0849-2121

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

만들기 위해서는 브래그 격자의 반사율을 서서히 증가시키는 형태의 에포다이제이션(apodization) 구조를 이용하면 된다^[11,12]. 하지만 에포다이즈드 브래그 격자에서는 격자의 깊이가 서서히 증가하다가 다시 감소하기 때문에 균일분포 브래그 격자와 비교하였을 때 반사율이 많이 낮아지게 된다. 에포다이즈드 브래그 격자의 반사율을 높이기 위해서 격자의 길이를 늘이는 방법이 있으나, 이는 최종 소자 크기를 소형화 하는데 방해가 된다. 에포다이즈드 브래그 격자 층에 고굴절률 폴리머를 삽입하면 에포다이제이션으로 인해 낮아진 반사율을 극복할 수 있다^[13,14].

본 연구에서는 에포다이즈드 브래그 격자 위에 고굴절 폴리머를 삽입하는 간단한 방법을 이용하여 대역폭이 좁으면서 반사율이 높은 파장 필터를 설계 및 제작하였다. 설계된 스펙트럼을 바탕으로 인접 채널 누화 (adjacent crosstalk)와 전체 대역폭 누화 (non-adjacent crosstalk)를 계산하였다. 제작된 파장 가변 필터의 반사율은 98.5%이며, 3-dB와 20-dB 대역폭은 각각 0.51 nm, 1.05 nm로 측정되었다.

II. 에포다이즈드 격자 파장 필터 설계

에포다이즈드 브래그 격자 위에 고굴절률 폴리머를 삽입한 파장가변 필터를 그림 1에 나타내었다. 넓은 파장대역을 가지는 광원인 SLED에서 나온 빛이 써큘레이터를 통과하여 제작된 소자에 입사되면 브래그 반사 파장 성분만 반사되어 돌아온다.

코어와 클래딩을 구성하는 폴리머 재료의 굴절률은 1.455와 1.435로 정하였고, 단일모드 조건을 만족시키는 립구조의 광도파로를 설계하기 위하여 유효굴절률법을 이용하였다. 광도파로 중심의 코어 두께는 2.5 μm 로 정하였고, 측면 코어의 두께는 0.5 μm 로 정하였을 때, 유효굴절률법을 이용한 계산에 따르면 광도파로 폭이 5 μm 이상이 되면 다중모드가 발생하게 되므로 최종 광도파로 폭은 4 μm 로 정하였다.

고굴절률 폴리머를 삽입하였을 때 격자의 깊이에 따라 변하는 반사율을 전송행렬법을 이용하여 설계하였다. 격자의 길이는 6.5 mm하였고 고굴절률 폴리머의 굴절률과 두께는 각각 1.480과 300 nm로 정하였다. 고굴절률 폴리머를 얇게 코팅하기 위하여 ZPU 폴리머와 PGMEA를 1:3으로 섞어서 실험을 해본 결과 4000 rpm으로 스핀코팅하였을 때 폴리머의 두께가 300 nm로 안정적으로 코팅이 되었기 때문에 300 nm로 고굴절률 폴리머의 두께를 정하였다.

균일 브래그 격자에서 에포다이제이션을 적용하면 반사율이 떨어지는 것을 그림 2(a)에서 볼 수 있으며, 격자의 깊이가 300 nm 정도는 되어야 균일 격자일 때의 반사율과 그 격차가 줄어서 반사율 100%에 근접하는 것을 확인하였다. 하지만 고굴절률층 폴리머를 삽입하면 그림 2(b)에서 볼 수 있는 것과 같이 에포다이즈드 격자의 깊이가 100 nm만 되어도 반사율이 100%에 근접 한다는 것을 확인할 수 있다. 이러한 설계 결과로부터 최종 격자 깊이를 100 nm로 결정하였다.

격자의 길이는 소자를 소형화시키기 위해 최대한 짧게 하

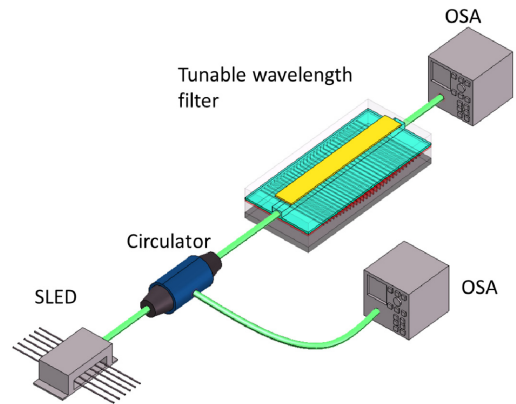


Fig. 1. Schematic diagram of apodized grating wavelength filters with high index polymer.

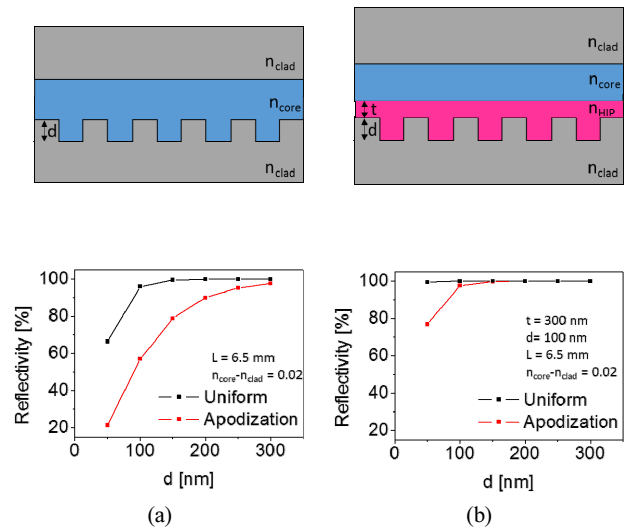


Fig. 2. (a) Reflectivity of the grating without high index polymer calculated for grating depth d and (b) with high index polymer calculated for grating depth d .

는 것이 필요하다. 격자 길이에 따른 반사율 계산 결과를 그림 3에 보이고 있다. 고굴절률 폴리머가 없는 균일한 격자에서는 격자 길이 7 mm일 때 반사율이 95% 이상이 된다. 그러나 그림 3(c)에서 보인 통과 대역폭을 보면 20-dB 대역폭이 1.81 nm 정도로 넓게 되는 것을 확인할 수 있다. 대역폭을 줄이기 위한 에포다이즈드 격자에서는 반사율이 부족하게 된다. 대역폭을 줄이고 충분한 반사율을 얻기 위해서 고굴절률 폴리머를 삽입한 에포다이즈드 격자의 경우에 대해서 반사율과 대역폭을 확인해 보았다. 그림 3(a)에서 반사율을 확인해보면 격자의 길이가 7 mm 이상인 경우에 반사율이 95% 이상으로 계산되었다. 3-dB 대역폭과 20-dB 대역폭을 확인하여 보면 각각 0.6 nm와 1 nm 정도로 인접 채널 누화를 억제할 수 있을 것이다.

반사 스펙트럼 설계 결과를 바탕으로 균일 격자와 에포다이즈드 격자의 경우에 대하여 각각 인접채널 누화와 전체 대역폭 누화를 구하였다. 인접 채널 누화와 전체 대역폭 누화

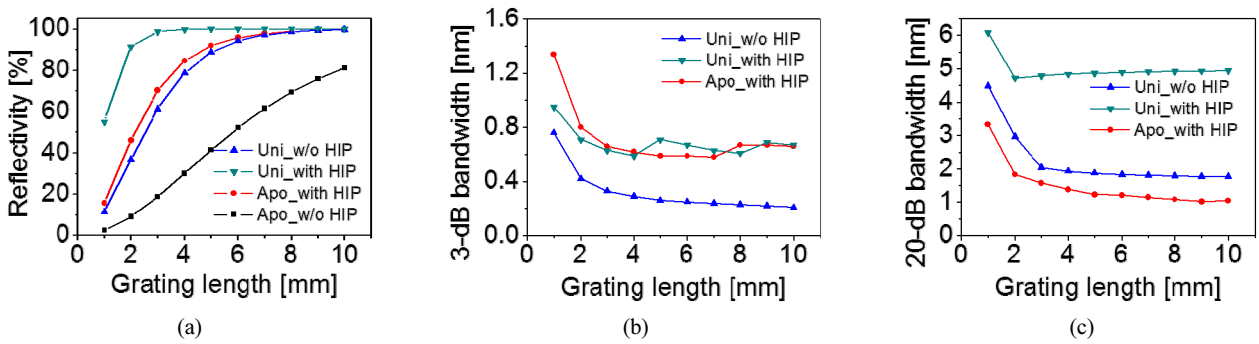


Fig. 3. Design of reflectivity and bandwidth for grating length. (a) Reflectivity, (b) 3-dB bandwidth, (c) 20-dB bandwidth.

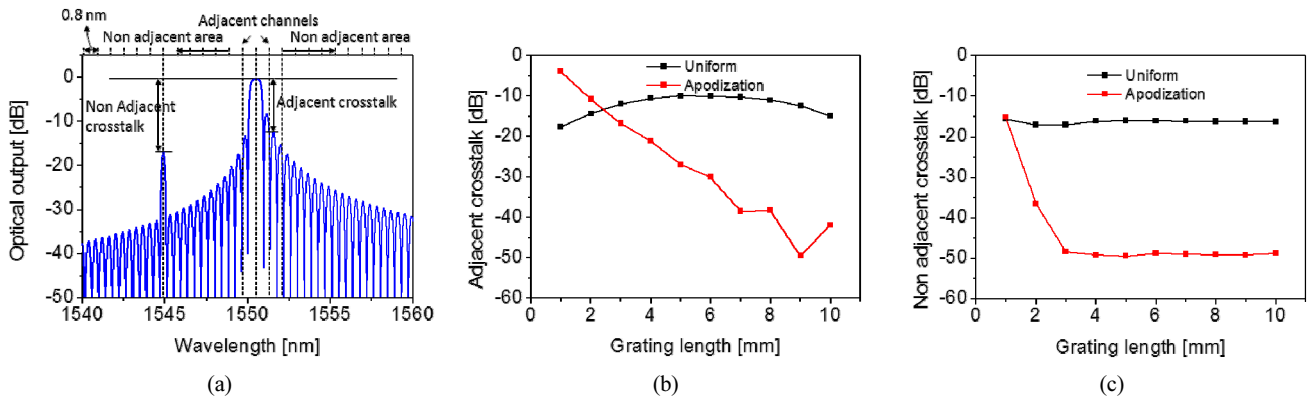


Fig. 4. (a) Definition of adjacent crosstalk and non-adjacent crosstalk, (b) adjacent crosstalk design for grating length, (c) non adjacent crosstalk design for grating length.

의 정의는 그림 4(a)에 나타내었다. 중심파장 주변 ± 0.8 nm 파장 위치에서 발생하는 출력 파워 중 가장 높은 광파워와 중심 파장에서의 광파워 간의 비율을 인접 채널 누화라 한다. 전체 대역폭 누화는 사용 가능한 전체 파장 대역내에서 원하지 않는 반사피크가 존재할 때 그 피크 파워와 중심 파장 파워를 비교한 값이 된다. 그림 4(b), 4(c)에서는 각각 격자의 길이에 따라 변하는 인접 채널 누화와 전체 대역폭 누화를 설계한 결과이다. 균일격자의 경우에는 인접 채널 누화나 전체 대역폭 누화나 격자의 길이가 늘어남에 따라 크게 -20 dB 보다 크게 증가함을 볼 수 있다. 반면에 에포다이즈드 격자의 경우는 충분한 반사율을 얻을 수 있는 길이 6 mm 이상에서 인접 채널 누화는 -30 dB보다 작았으며 전체 대역폭 누화는 -50 dB 정도로 계산이 되었다.

III. 에포다이즈드 브래그 격자 파장 필터 제작

고굴절률 폴리머와 에포다이즈드 격자를 적용한 파장가변 필터의 제작공정은 그림 5에 나타내었다. 실리콘 웨이퍼 위에 하부 클래딩을 형성하기 위하여 켈옵틱스사에서 구입한 굴절률이 1.435인 ZPU 폴리머를 스펀코팅 하였다. 하부 클래딩층 위에 TSMR photoresist를 스펀코팅한 후 레이저 간섭계를 이용하여 균일한 photoresist 격자를 생성하였다.

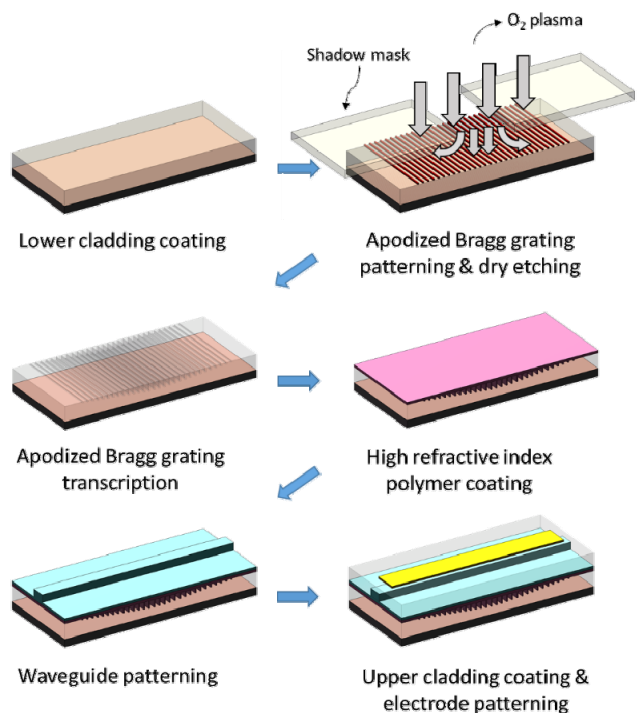


Fig. 5. Schematic fabrication procedure of apodized grating wavelength filter with high index polymer.

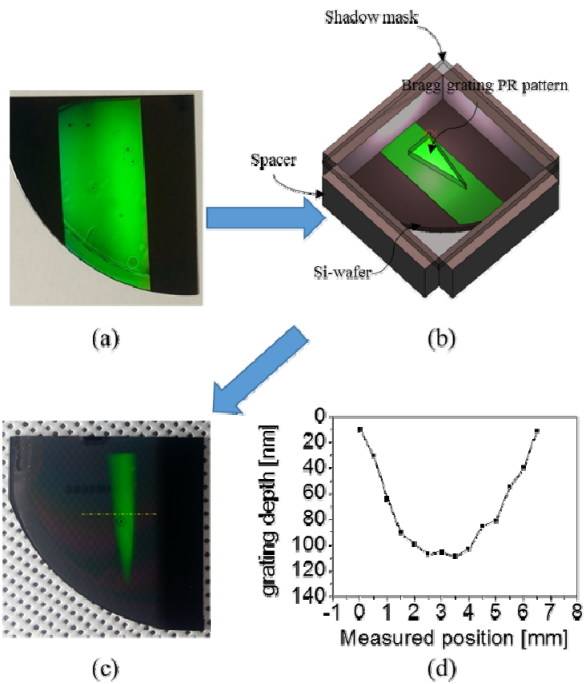


Fig. 6. (a) A fabricated photoresist grating on the lower cladding. (b) A apodized Bragg grating fabrication process with a shadow mask. (c) the fabricated apodized Bragg grating on a silicon wafer. (d) AFM measurement results of grating depth.

하부 클래딩층 위에 photoresist 격자를 생성한 모습이 담긴 사진을 그림 6(a)에 나타내었다. 에포다이즈드 격자를 생성하기 위하여 웨도우 마스크를 이용하여 에칭을 하는 모습은 그림 6(b)에 나타내었다. 하부 클래딩층과 웨도우 마스크의 거리를 띄우기 위하여 spacer의 높이를 5 mm로 하였으며 그 위에 웨도우 마스크를 얹은 상태로 산소 플라즈마 건식식각을 하여 에포다이즈드 격자를 형성하였다. 건식식각 후에 에포다이즈드 격자의 사진을 그림 6(c)에 나타내었다. 에포다이즈드 격자의 깊이를 측정하기 위하여 AFM (atomic force microscope)를 이용하여 측정하였다. 그림 6(c)의 노란 점선 부분의 깊이를 그림 6(d)에 나타내었다. 격자의 깊이가 중심부에서 100 nm 정도이고 가장자리로 갈수록 서서히 얕아지는 에포다이즈드 격자가 생성된 것을 확인하였다.

형성된 에포다이즈드 격자 위에 고굴절률 폴리머를 얇게 코팅하기 위하여 ZPU13-480 (RI: 1.480 @ 1550 nm)과 PGMEA를 1:3의 비율로 섞어서 4000 rpm으로 30초 코팅하였다. 고굴절률 폴리머 코팅한 후 그 위에 광도파로를 형성하기 위한 코어 폴리머로 ZPU13-455 (RI: 1.455 @ 1550 nm)를 4500 rpm으로 30초 스핀코팅 하여 두께 2.6 μm 를 형성하였다. 광도파로를 형성하기 위하여 포토 리소그래피 공법을 사용하였다. 코어층 위에 AZ5214 photoresist를 스핀코팅한 웨이퍼를 광도파로 패턴이 새겨진 포토마스크를 장착시킨 mask aligner에 놓고 광도파로 패턴을 격자패턴에 수직으로 정렬시킨 후 노광하였다. 이후 건식 식각 공정을 통해 2.15 μm 를 식각하여 광도파로를 생성하였다. 상부 클래딩은 하부 클래딩과 마찬가지로 ZPU13-435 (RI: 1.435 @ 1550 nm)로 코팅을 하였다. 파장가변 할 때 필요한 전극을 형성하기 위하여 thermal evaporator 장비를 이용하여 Cr-Au (10 nm-100 nm)를 증착하였으며 포토리소그래피와 습식식각 방법을 이용하여 완성하였다.

IV. 반사 및 투과 스펙트럼 측정 결과

제작된 파장가변필터의 투과, 반사 스펙트럼을 측정하기 위한 셋업은 다음과 같다. 1550 nm의 중심파장을 가지며 50 nm의 3-dB 대역폭을 지닌 SLED (superluminescent emitting diodes)를 광원으로 사용하였다. 광원에서 나온 빛은 편광조절기를 이용하여 TE편광으로 맞추고 파장필터의 격자를 지난 투과 스펙트럼과 반사되어 나온 스펙트럼을 해상도가 0.05 nm인 OSA (optical spectrum analyzer)를 사용하여 측정 한 결과를 그림 7(a)에 나타내었다. 반사 스펙트럼의 중심파장은 1535.5 nm였으며, 에포다이즈드 격자 길이가 6.5 mm일 때 반사율 98.5%이고, 3-dB와 20-dB 대역폭은 각각 0.51 nm와 1.05 nm가 되었다. 브래그 격자의 반사율에는 광도파로 소자의 커플링 손실, 광도파로 전파 손실, 그리고 외부 써큘레이터의 손실이 영향을 미치게 된다. 써큘레이터 손실은 독립적으로 측정하여 반사율 값을 보정하면 되고, 광도파로 소자에서 일어나는 손실은 투과율과 반사율을 비교하여 구할 수 있다. 즉, 반사파와 투과파의 진행 경로 길이가 같다고 할

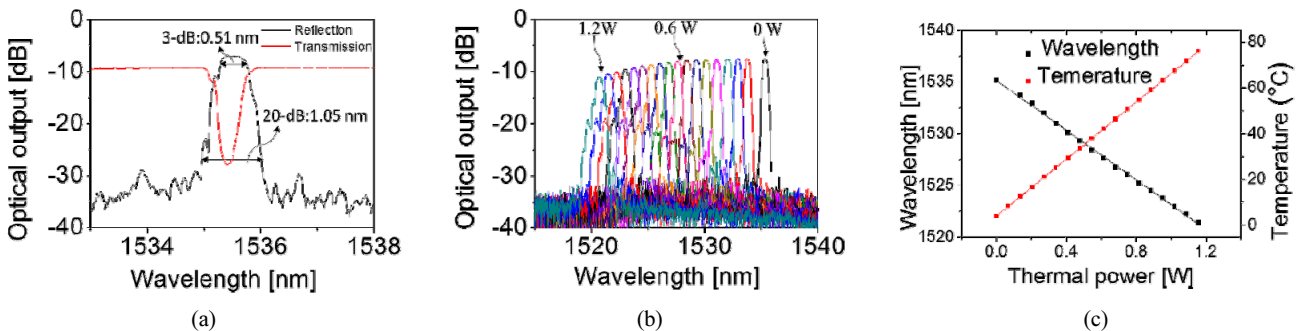


Fig. 7. (a) Reflection and transmission spectra of apodized Bragg grating with high index polymer. (b) wavelength tuning results of apodized Bragg grating with high index polymer. (c) Wavelength and temperature for thermal power.

때, 브래그 반사 파장에서의 반사파의 세기가 다른 파장 대역의 투과파보다 약하게 나타나면 이는 반사율이 100%가 되지 못하기 때문이다. 이러한 과정을 통하여 측정된 값으로부터 반사율을 계산하게 되는데 이 과정에서 유발되는 오차는 대략 0.5 dB 이하라고 볼 수 있다. 제작된 파장필터의 파장 가변특성을 확인하기 위하여 전극에 전류를 인가하여 열을 발생시키면서 반사스펙트럼을 측정하였고 그 결과를 그림 7(b)에 나타내었다. 1.15 W 인가 시 12 nm의 파장이 가변되는 것을 확인하였다. 온도 변화에 따른 파장 변화는 다음 식 (1)로 구할 수가 있다^[13].

$$\Delta\lambda_B = 2 \frac{A_g}{m} \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T \quad (1)$$

이 식에서 $\Delta\lambda_B$ 는 브래그 반사 파장의 이동, A_g 는 브래그 격자의 주기, m 은 브래그 격자의 차수, $\partial n/\partial T$ 는 폴리머의 열광학계수, ΔT 는 광도파로 중심에서 온도의 변화이다. ZPU 폴리머의 열광학 계수는 $-1.8 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ 이며, 12 nm 파장 변화를 위하여 필요한 온도 변화는 75°C 가 된다. 이때 폴리머 박막의 두께와 히터의 구조를 고려하여 온도 분포를 계산해보면 마이크로히터의 온도는 145°C 정도가 된다. 가변파장 필터에서 열을 인가할 때 파장 가변과 함께 반사율이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 가변 파장 필터에서 열을 인가할 때 파장 가변과 함께 반사율이 줄어드는 것은 광도파로의 굴절률이 비대칭적으로 줄어들면서 나타나는 도파모드의 방사 현상 때문이다. 이를 개선하기 위해서는 광도파로에 인가되는 열분포를 균일하게 만들어 주는 것이 필요하며, 이를 위해서 마이크로 히터를 광도파로 하부에 위치시키는 연구도 발표 되었다^[13].

V. 결 론

본 논문에서는 고굴절률 폴리머와 에포다이어드 격자를 이용하여 높은 반사율과 좁은 대역폭을 가지는 파장필터를 설계, 제작하였다. 격자 길이 7 mm, 격자 깊이 100 nm, 고굴절률 폴리머 두께 300 nm일 때 반사율 97%, 3-dB 대역폭 0.6 nm, 20-dB 대역폭 1.0 nm의 설계 결과를 얻을 수 있었으며, 제작된 소자로부터 격자 길이 6.5 mm일 때 98.5%이며, 3-dB, 20-dB 대역폭은 0.51 nm, 1.05 nm인 특성을 가짐을 확인하였다. 파장가변특성을 확인하기 위하여 제작된 마이크로 히터에 1.15 W를 인가하여 12 nm 파장 가변을 시킬 수 있었다. 에포다이어드 격자를 이용하면 사이드로브가 억제된 반사스펙트럼을 생성할 수 있어 채널 간 누화가 억제된 파장필터를 제작할 수 있다는 것을 확인하였다.

감사의 글

이 논문의 결과물은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)의 지원을 받아서 도출되었음.

References

1. D. Sadot and E. Boimovich, "Tunable optical filters for dense WDM networks," *IEEE Commun. Mag.* **36**, 55-55 (1998).
2. Y. Wang, H. Zhu, and B. Li, "Cascaded Mach-Zehnder interferometers assembled by submicrometer PTT wires," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **21**, 1115-1117 (2009).
3. H. Yu, M. Chen, P. Li, S. Yang, H. Chen, and S. Xie, "Silicon-on-insulator narrow-passband filter based on cascaded MZIs incorporating enhanced FSR for down-converting analog photonic links," *Opt. Express* **21**, 6749-6755 (2013).
4. K. McCallion, W. Johnstone, and G. Fawcett, "Tunable in-line fiber-optic bandpass filter," *Opt. Lett.* **19**, 542-544 (1994).
5. K.-R. Sohn and J.-W. Song, "Thermooptically tunable side-polished fiber comb filter and its application," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **14**, 1575-1577 (2002).
6. M. Strassner, C. Luber, A. Tarraf, and N. Chitica, "Widely tunable-constant bandwidth monolithic Fabry-Perot filter with a stable cavity design for WDM systems," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **14**, 1548-1550 (2002).
7. B. Yu, G. Pickrell, and A. Wang, "Thermally tunable extrinsic Fabry-Perot filter," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16**, 2296-2298 (2004).
8. J. S. Milne, J. M. Dell, A. J. Keating, and L. Faraone, "Widely tunable MEMS-based Fabry-Perot filter," *J. Microelectromech. Syst.* **18**, 905-913 (2009).
9. M.-C. Oh, M.-H. Lee, J.-H. Ahn, H.-J. Lee, and S. G. Han, "Polymeric wavelength filters with polymer gratings," *Appl. Phys. Lett.* **72**, 1559-1561 (1998).
10. L. Eldada, S. Yin, C. Poga, C. Glass, R. Blomquist, and R. A. Norwood, "Integrated multichannel OADM's using polymer Bragg grating MZI's," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **10**, 1416-1418 (1998).
11. G. Huang, J.-S. Shin, W.-J. Lee, T.-H. Park, W.-S. Chu, and M.-C. Oh, "Surface relief apodized grating tunable filters produced by using a shadow mask," *Opt. Express* **23**, 21090-21096 (2015).
12. W.-J. Lee, G. Huang, J.-S. Shin, and M.-C. Oh, "Polymer waveguide apodized grating for narrow-bandwidth high-reflectivity wavelength filters," *Korean J. Opt. Photon.* **26**, 203-208 (2015).
13. M.-C. Oh, H.-J. Lee, M.-H. Lee, J.-H. Ahn, S.-G. Han, and H.-G. Kim, "Tunable wavelength filters with Bragg gratings in polymer waveguides," *Appl. Phys. Lett.* **73**, 2543-2545 (1998).
14. I.-S. In, H.-R. Park, S.-W. Lee, and M.-H. Lee, "Polymeric waveguides with bragg gratings in the middle of the core layer," *J. Opt. Soc. Korea* **13**, 294-298 (2009).
15. Z. Zhang and N. keil, "Thermo-optic devices on polymer platform," *Opt. Commun.* **362**, 101-114 (2015).