

## Polymer Waveguide Apodized Grating for Narrow-Bandwidth High-Reflectivity Wavelength Filters

Won-Jun Lee<sup>1</sup>, Guanghao Huang<sup>1</sup>, Jin-Soo Shin<sup>2</sup>, and Min-Cheol Oh<sup>1†</sup>

<sup>1</sup>Nano-Bio Photonics Lab., Department of Electronic Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

<sup>2</sup>Photonic Networks Research Lab., Department of Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701, Korea

(Received May 8, 2015; Revised manuscript June 16, 2015; Accepted June 17, 2015)

Wavelength filters are essential components for selecting a certain wavelength channel of a WDM optical communication system. To realize wavelength filters with narrow bandwidth and high reflectivity, an apodized grating structure with length of 15 mm and index modulation of  $5 \times 10^{-4}$  was designed. The device exhibited a reflectivity of 95%, 3-dB bandwidth of 0.28 nm, and 20-dB bandwidth of 0.70 nm on an 18 mm grating length.

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

OCIS codes: (130.0130) Integrated optics; (130.5460) Polymer waveguides; (130.7408) Wavelength filtering devices; (230.7408) Wavelength filtering devices; (230.0230) Optical devices

### 협대역 고반사 파장 필터 구현을 위한 폴리머 광도파로 에포다이즈드 격자

이원준<sup>1</sup> · 황광호<sup>1</sup> · 신진수<sup>2</sup> · 오민철<sup>1†</sup>

<sup>1</sup>부산대학교 전자공학과 나노바이오광소자연구실  
Ⓞ 609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지

<sup>2</sup>한국과학기술원 전자공학과 광네트워크연구실  
Ⓞ 305-701 대전광역시 유성구 구성동 373-1

(2015년 5월 8일 받음, 2015년 6월 16일 수정본 받음, 2015년 6월 17일 게재 확정)

파장 투과 대역폭이 좁으면서도 반사율이 높은 파장 필터를 구현하기 위해서 격자의 반사율이 진행 방향을 따라 서서히 변하는 구조의 에포다이즈드 격자 구조를 폴리머 광도파로와 함께 제작하였다. 격자로 인한 유효 굴절률 변화가  $5 \times 10^{-4}$ 인 경우에 대하여 에포다이즈드 격자의 길이에 따른 반사율 변화를 설계하였으며 길이가 15 mm 이상이 되는 경우에 반사율이 99%에 도달함을 확인하였다. 길이가 서로 다른 여러 개의 격자를 제작하여 반사율, 3-dB 대역폭, 20-dB 대역폭을 측정하였으며, 격자 길이가 18 mm인 소자에서 95%의 반사율을 얻을 수 있었고, 이때 3-dB 대역폭은 0.28 nm, 그리고 20-dB 대역폭은 0.70 nm의 특성을 가짐을 확인하였다.

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

OCIS codes: (130.0130) Integrated optics; (130.5460) Polymer waveguides; (130.7408) Wavelength filtering devices; (230.7408) Wavelength filtering devices; (230.0230) Optical devices

### I. 서 론

파장 필터는 특정 파장 대역을 선택, 투과시킬 수 있는 광 소자로서 파장분할 다중방식 광통신 시스템에서 단일 파장을 선택하거나 분리하기 위한 필수적인 소자이다<sup>[1, 2]</sup>. 또한,

건물이나 다리와 같은 구조물의 변형 유무를 검사하거나 습도나 온도 등의 외부 환경 변화를 감지하기 위한 센서 그리고 의료용 OCT와 같은 다양한 분야에 적용되고 있다<sup>[3-5]</sup>.

파장 필터를 구현하기 위한 방법으로 박막 구조<sup>[6-8]</sup>, 패브리 페로 구조<sup>[9, 10]</sup>, 그리고 광섬유 격자 구조<sup>[11, 12]</sup> 등을 이

<sup>†</sup>E-mail: mincheoloh@pusan.ac.kr

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

용한 연구가 활발히 진행되었다. 박막 구조 기반의 파장 필터의 경우 열 안정성과 높은 재연성의 장점이 있지만 가변 속도가 느린 단점이 있다. 패브리 페로 구조 기반의 파장 필터의 경우 낮은 편광 의존성과 좁은 파장 대역폭을 가지지만 반사판 사이의 거리를 기계적으로 조절해야 하기 때문에 장기적인 안정성의 문제가 있다. 광섬유 격자 구조 기반의 파장 필터는 채널 간의 누화가 적고 대역폭이 좁은 장점이 있으나, 가변 속도가 느리고 파장 가변 범위가 좁은 단점이 있다.

폴리머 기반 브래그 격자 파장 필터의 경우 제작 공정이 단순하며 에피 구조 제작이 용이하며 저가의 제작 공정 장비를 이용하여 제작할 수 있는 장점이 있다. 또한 폴리머의 높은 열 광학 계수를 이용하여 넓은 파장 가변 범위를 가지는 파장 필터를 구현할 수 있다<sup>[13]</sup>.

WDM 광통신 시스템에서 제한적인 대역폭을 이용하여 최대한 많은 수의 파장 신호를 전송하고 검출하기 위해서는 좁은 통과 대역폭을 가지는 파장 필터가 필요하다. 하지만 일반적인 균일분포 브래그 격자의 경우에는 반사율의 증가와 더불어 대역폭이 넓어지는 문제를 지니고 있으며, 이는 WDM 광통신 시스템에서 인접한 채널의 파장 신호로 인한 누화를 발생시키는 원인이 된다<sup>[14-16]</sup>. 그러므로 인접한 채널 간의 신호 누화를 방지하고 시스템의 성능을 향상시키기 위해서는 파장 필터의 대역폭을 줄이는 것이 필요하다. 이를 위해 파동의 진행방향에 따라 브래그 격자의 반사율이 서서히 변화하는 형태의 에포다이즈드 격자가 필요하다. 에포다이즈드 격자를 이용하면 반사율이 100%에 근접하면서도 통과 대역폭이 좁은 형태의 파장 필터를 구현할 수 있다.

본 논문에서는 폴리머 광도파로를 이용하여 에포다이즈드 격자 구조를 제작하기 위한 공정을 개발하였다. 간편한 웨도우 마스크 제작 방법을 제안하고 이를 이용하여 격자의 위치에 따라 수직 방향의 에칭 깊이가 서서히 변화하는 에포다이즈드 격자를 형성할 수 있었다. 제작된 에포다이즈드 파장 필터의 반사율은 100%에 근접하였으며 3-dB와 20-dB 대역폭은 각각 0.165 nm와 0.44 nm로 나타났다.

## II. 에포다이즈드 격자 파장 필터 설계

일반적인 브래그 격자는 광격자의 구조가 균일하게 분포되는 반면 에포다이즈드 브래그 격자는 빛의 진행방향을 따라 가면서 광격자의 반사율이 서서히 증가하고 감소되는 구조를 지닌다. 폴리머 광도파로의 하부 클래딩과 코어 사이에 에포다이즈드 격자를 형성한 파장 필터 소자의 구조를 Fig. 1에서 보이고 있다. 여러 개의 파장 성분이 섞여져 있는 광대역 광원을 소자에 입사시키면 특정파장 성분만 반사되어 돌아오게 되며, 이를 써큘레이터를 통과시켜 다른 출력부로 뽑아내면 파장 필터링이 이루어진다.

폴리머 광도파로를 단일모드 형태로 제작하기 위하여 본 연구에서 선택한 코어와 클래딩 폴리머의 굴절률은 각각 1.455와 1.440이며, 유효굴절률 방법 (effective index method)을 이용하여 립 형태의 단일 모드 광도파로를 설계하였다.

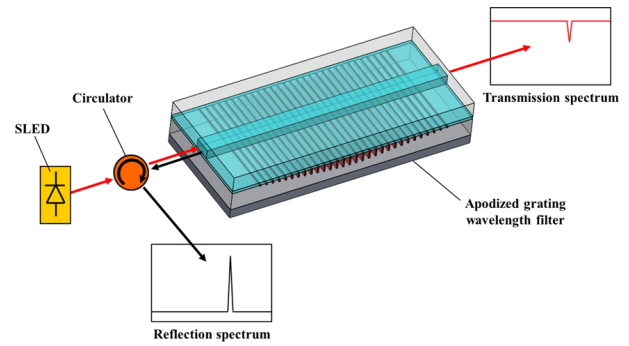


FIG. 1. Schematic diagram of apodized grating wavelength filters with high reflectivity and narrow bandwidth.

일반적으로 코어와 클래딩의 굴절률 차이가 커질수록 단일 모드로 동작하는 광도파로의 크기는 작아지게 되는데, 이로 인해 단일 모드 광섬유와의 모드 크기 차이로 인해 입출력 결합 손실이 증가한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 Fig. 2(a)와 같은 립 형태의 폴리머 광도파로 구조를 이용하여 도파로 코어의 단면적을 넓힐 수 있다. 코어의 두께를  $t_1$ , 측면 코어의 두께를  $t_2$ , 그리고 광도파로의 폭을  $w$ 로 정의하였다. 코어의 두께 변화에 따른 유효굴절률의 변화는 Fig. 2(b)와 같다. 코어 두께가 약 4  $\mu\text{m}$ 에서 다중 모드가 나타나기 때문에,  $t_1$ 은 3.5  $\mu\text{m}$ 로 결정하였으며, 사용된 포토레지스트의 식각률을 고려하여  $t_2$ 는 1  $\mu\text{m}$ 로 결정하였다. 이 때 유효굴절률은 각각 1.44928과 1.44212이 되며 이 둘의 차이인  $\Delta N_{\text{eff}}$  값은 0.00716 이 된다. 다음으로 광도파로의 폭,  $w$ 를 결정하기 위해  $\Delta N_{\text{eff}}$ 만큼의 유효굴절률 차이를 가지는 평면 광도파로에서  $w$ 의 변화에 따른 유효굴절률의 변화를 Fig. 2(c)와 같이 구한다. 단일 모드 조건을 만족시키기 위해,  $w$ 는 6  $\mu\text{m}$ 로 결정하였으며 도파모드의 최종적인 유효굴절률은 1.44704가 된다.

에포다이즈드 브래그 격자의 파장 특성을 살펴보기 위해 전송행렬법을 이용하여 투과, 반사 스펙트럼을 계산하였으며, 균일한 브래그 격자의 파장 특성도 함께 구하였다. 격자 길이가 15 mm 일 때, 유효굴절률 변화가  $5 \times 10^{-4}$  인 균일한 브래그 격자의 반사스펙트럼이 Fig. 3(a)이며, Fig. 3(b)는 0에서부터  $5 \times 10^{-4}$  까지 선형적으로 커졌다가 다시 작아지는 에포다이즈드 브래그 격자의 반사스펙트럼이다. 두 가지 격자의 반사율이 모두 100%가 되었을 때 에포다이즈드 브래그 격자의 20-dB 대역폭은 균일 브래그 격자의 경우보다 훨씬 좁게 유지됨을 볼 수 있다.

격자 구조에 의한 유효굴절률의 변화가  $5 \times 10^{-4}$  인 경우 격자의 길이 변화에 따른 에포다이즈드 브래그 격자와 균일한 브래그 격자의 반사율, 3-dB 대역폭 그리고 20-dB 대역폭의 변화를 Fig. 3(c)에서 비교하여 보이고 있다. 100%의 반사율을 얻기 위한 에포다이즈드 격자의 길이는 15 mm이며 균일한 브래그 격자의 경우 12 mm이다. 에포다이즈드 브래그 격자의 경우 반사율이 파동의 진행방향에 따라 서서히 변하기 때문에 균일한 브래그 격자와 동일한 반사율을 얻기 위해서

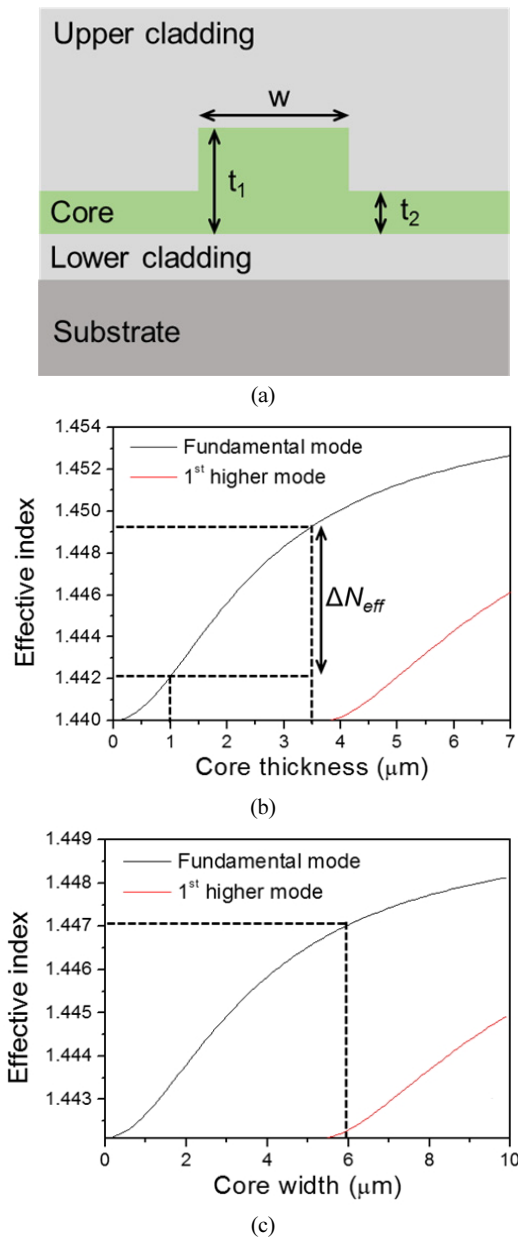


FIG. 2. Design procedures of the single mode rib polymer waveguide: (a) Cross-section of the polymer waveguide, and the effective index calculated as a function of (b) core thickness and (c) core width.

는 격자의 길이가 늘어나야 한다. 에포다이즈드 브래그 격자의 경우 3-dB 대역폭과 20-dB 대역폭은 각각 0.195 nm와 0.51 nm이며 균일한 브래그 격자의 경우 0.235 nm와 1.62 nm이다. 이를 통해 에포다이즈드 브래그 격자가 균일한 브래그 격자에 비해 좁은 대역폭의 파장 특성을 가짐을 알 수 있다. Figure 3(d)는 브래그 격자의 길이가 15 mm 인 경우, 브래그 격자 구조에 의해 유효굴절률이 변할 때 에포다이즈드 격자와 균일한 브래그 격자의 반사율, 3-dB 대역폭 그리고 20-dB 대역폭의 변화를 나타낸 결과이다.

Figure 3(c), (d)에서 알 수 있듯이 격자 길이와 격자의 유효

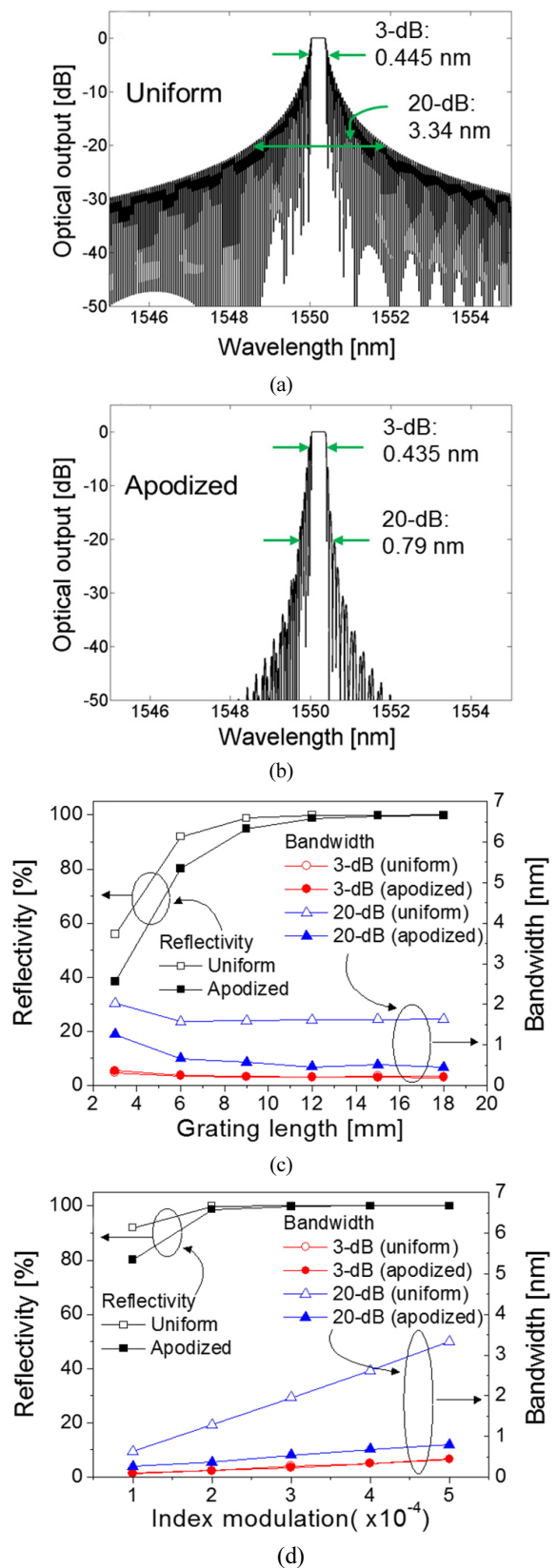


FIG. 3. Design results of (a) uniform Bragg grating, (b) linearly apodized Bragg grating. The reflectivity, and 3-dB and 20-dB bandwidths calculated as a function of (c) grating length and (d) index contrast due to the grating thickness modulation.

효율률을 변화가 커질수록 균일 브래그 격자와 에포다이즈드 브래그 격자의 반사율은 커지게 된다. 또한, 에포다이즈드 브래그 격자에서 유효굴절률 변화가 가장 큰 영역은  $5 \times 10^{-4}$  로써, 균일 브래그 격자와 동일하기 때문에 3-dB 대역폭이 흡사한 경향을 보인다. 반면, 20-dB 대역폭은 에포다이즈드 격자가 균일한 격자에 비해서 훨씬 좁게 나타난다. 최종적으로 100%의 반사율을 가지며 파장분할 다중방식 광통신 시스템에서 요구하는 0.4 nm의 3-dB 대역폭과 1 nm의 20-dB 대역폭을 만족하는 파장 특성을 가지는 에포다이즈드 격자를 설계하기 위해 격자 길이는 16 mm로 결정하였으며 격자 구조에 의한 유효굴절률 변화는  $3 \times 10^{-4}$ 이 되도록 격자 깊이를 150 nm로 결정하였다.

### III. 에포다이즈드 브래그 격자 파장 필터 제작

에포다이즈드 브래그 격자 파장 필터를 제작하기 위한 공정은 Fig. 4와 같다. Si 기판 위에 10  $\mu\text{m}$  두께의 하부 클래딩층을 형성하기 위해 ZAP 1020 adhesion promoter를 코팅한 후 ZPU-440 물질을 1000 rpm으로 30초간 코팅하고 5분간 UV 경화시켰다. 하부 클래딩층 위에 g-line photoresist 인 TSMR을 2000 rpm으로 30초간 코팅한 후 He-Cd laser (KIMMON, 442 nm)를 광원으로 사용하는 레이저 간섭계를 이용하여 균일한 브래그 격자 PR 패턴을 먼저 제작한다.

에포다이즈드 격자 구조를 형성하기 위해서는 웨도우 마스크를 이용한 산소 플라즈마 공정을 통하여 브래그 격자 PR 패턴을 하부 클래딩 층에 식각하여 새겨 넣게 된다. 산소 플라즈마 식각 과정에서 Fig. 5(a), (b)에서 보인 바와 같이 중앙 부분은 식각이 많이 되는 반면 가장자리는 식각이 상대적으로 작게 된다. 웨도우 마스크에 의해 완전히 가려져 있는 부분은 식각이 되지 않으므로 격자의 식각 깊이가 가장자리로 갈수록 천천히 알아지는 에포다이즈드 브래그 격자를 얻을 수 있다.

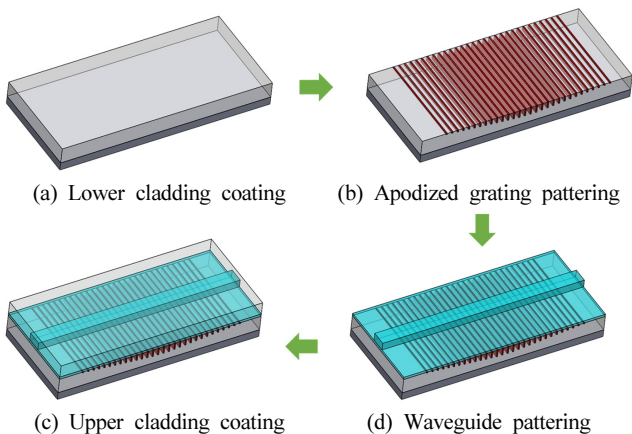


FIG. 4. Schematic fabrication procedures of apodized grating wavelength filter: (a) lower cladding coating, (b) apodized Bragg grating patterning with shadow mask, (c) waveguide patterning with photolithography and O<sub>2</sub> plasma etching, and (d) upper cladding coating.

본 논문에서 제안한 웨도우 마스크 제작 방법은 매우 간단하며 폴리머 광도파로 공정과 호환 가능하다. 또한 웨도우 마스크와 샘플간의 간격, h는 실리콘 웨이퍼 조각을 적층하여 쉽게 조절 가능하며 에퍼처의 형태를 변경함으로써 에포다이즈드 브래그 격자의 형태와 깊이 변화를 쉽게 변경할 수 있는 장점이 있다. 또한, 원하는 형태의 에포다이즈드 격자 제작을 위해서, 웨도우 마스크의 h와 w의 조건을 찾는 과정이 필요한데, 반복적인 실험을 통해서 웨도우 마스크의 h가 커질수록 격자의 식각 깊이가 변화가 완만해지는 경향을 확인할 수 있으며, w에 따라 균일한 격자의 영역을 줄이거나 넓힐 수 있다. 본 연구에서는 웨도우 마스크의 h와 w를 각각 5 mm로 설정한 후 45 초간 산소 플라즈마 식각을 진행하였다.

제작된 에포다이즈드 브래그 격자의 깊이를 측정하기 위해 AFM(atomic force microscope)을 이용하여 브래그 격자의 깊이를 측정하였으며 식각 공정을 진행하기 이전의 브래그 격자의 깊이와 비교한 결과를 Fig. 5(c)에 나타내었으며, 격자의 깊이가 점진적으로 변하는 에포다이즈드 브래그 격자가 형성됨을 확인하였다.

에포다이즈드 브래그 격자를 형성한 후 3.5  $\mu\text{m}$  두께의 코

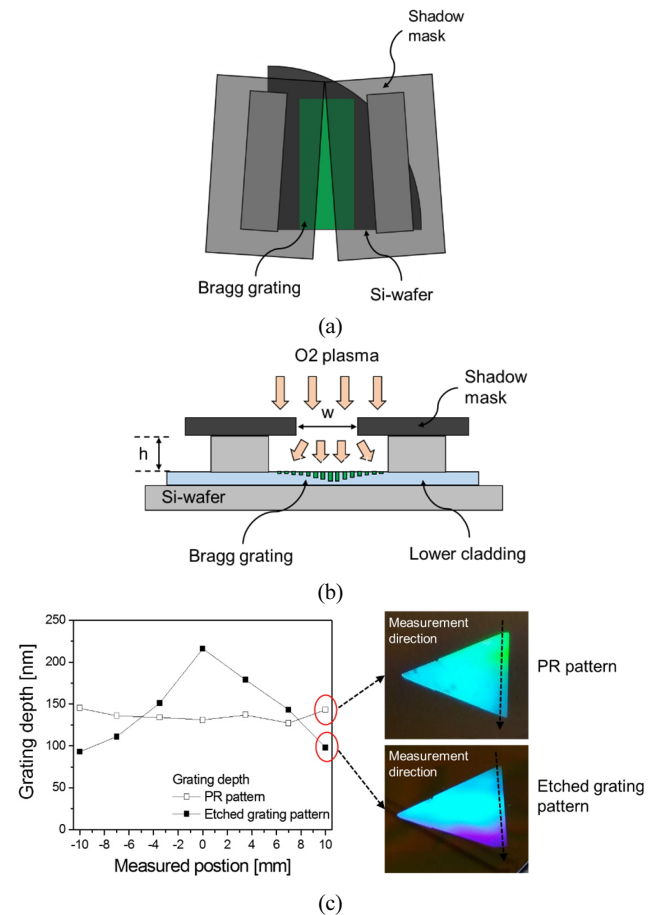


FIG. 5. Schematic diagram for producing apodized Bragg grating with a shadow mask shown as (a) top view and (b) side view, and (c) AFM measurement results of grating depth before and after the dry etching.

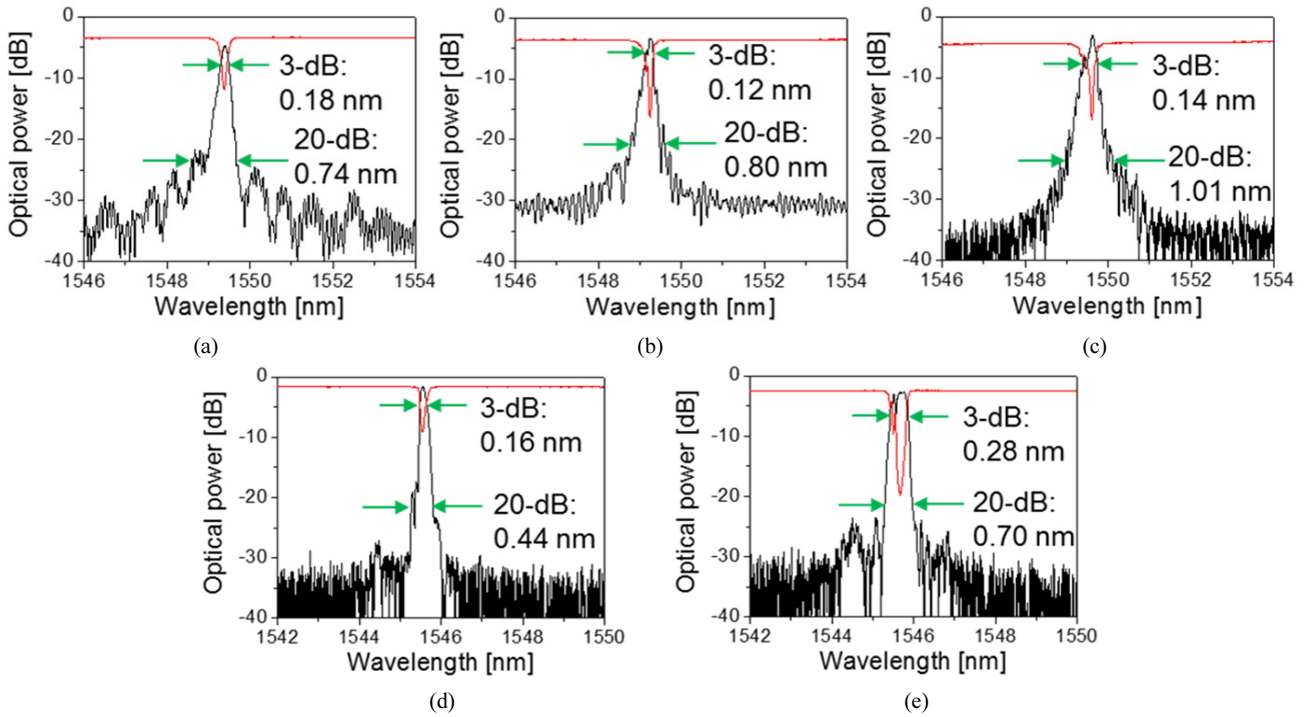


FIG. 6. Reflection spectra measured from uniform Bragg gratings with length of (a) 14 mm, (b) 16 mm, and (c) 18 mm, and that of apodized Bragg gratings of (d) 16 mm and (e) 18 mm.

어층을 형성하기 위해 ZPU-455 물질을 3000 rpm 으로 30초 간 코팅하고 5분간 UV 경화시켰다. 코어를 2.5 μm 식각하기 위해 2000 rpm으로 30초간 코팅하여 2 μm 두께의 AZ5214 포토레지스트 박막을 형성한 후 포토리소그래피와 건식 식각 공정을 통해 광도파로 패턴을 형성하였다. 마지막으로 10 μm 두께의 상부 클래딩층을 형성하기 위해 ZIY-440 물질을 1000 rpm으로 30초간 코팅하고 5 분간 Y<sub>5</sub> 경화하였다.

#### IV. 반사 및 투과 스펙트럼 측정 결과

제작된 에포다이즈드 브래그 격자의 특성을 측정하기 위한 실험 셋업은 다음과 같다. 중심 파장이 1550 nm이며 3-dB 대역폭이 50 nm 인 SLED를 광원으로 사용하였으며 에포다이즈드 브래그 격자에 입력되는 빛의 편광은 TE 가 되도록 편광 조절기를 이용하였다. 브래그 격자에 의해 반사되는 파장을 분리하기 위해 서큘레이터를 사용하였으며 광 스펙트럼 분석기(OSA: Optical Spectrum analyzer)를 이용하여 측정하였다. 격자의 길이가 14 mm, 16 mm 그리고 18 mm인 균일한 브래그 격자의 파장 특성의 측정 결과는 Fig. 6 (a), (b) 그리고 (c)와 같으며 반사율은 각각 74%, 92% 그리고 100%이다. 3-dB 대역폭은 각각 0.18 nm, 0.12 nm 그리고 0.14 nm이며 20-dB 대역폭은 각각 0.74 nm, 0.8 nm 그리고 1.01 nm이다. 그리고 Fig. 6(d)와 (e)는 격자 길이가 16 mm와 18 mm인 에포다이즈드 브래그 격자의 파장 특성 측정 결과이다. 반사율은 98%와 95%이며 3-dB 대역폭은 각각 0.16 nm와 0.28 nm이다. 또한 20-dB 대역폭은 각각 0.44 nm와 0.70 nm이다.

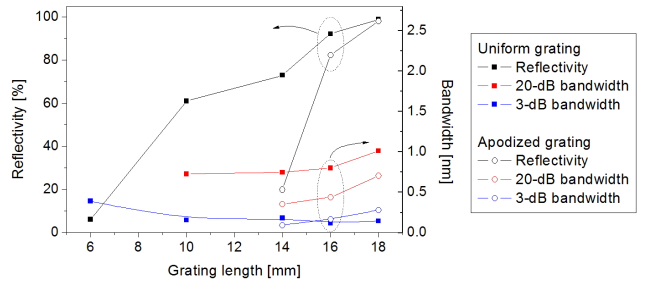


FIG. 7. Comparison of apodized grating and uniform grating which of the 3-dB, 20-dB bandwidth and reflectivity are measured as a function of grating length.

두 소자의 격자 길이에 따른 반사율과 3-dB, 20-dB 대역폭 변화를 Fig. 7을 통해서 비교해 보았다. 격자가 길어질 수록 반사율이 높아지면서 3-dB 대역폭과 20-dB 대역폭이 넓어지는 경향을 확인할 수 있는데, 균일한 브래그 격자의 경우, 격자 길이가 16 mm와 18 mm에서 100 %에 근접한 반사율을 가지는 반면 14 mm에서는 반사율이 74 % 정도로 그치고 있어, 오히려 3-dB 대역폭이 더 큰 것을 알 수 있다. 반면 에포다이즈드 격자의 경우, 짧은 길이일수록 균일한 격자의 영역도 역시 작아지기 때문에 반사율이 급격히 낮아지며, 3-dB 및 20-dB 대역폭은 좁게 나타났다. 반대로 격자가 길어지게 되면, 균일한 격자의 영역 또한 커지게 되어, 반사율은 급격히 높아지고, 이로 인해 3-dB, 20-dB 대역폭은 넓어지는 경향을 보였다.

Figure 6과 7에서 알 수 있듯이 두 소자 모두 반사율이 100%에 근접한 경우라도 에포다이드드 브래그 격자가 균일한 브래그 격자에 비해서 20-dB 대역폭이 좁아진 것을 확인하였고, 이를 통해 인접 채널간의 신호 누화가 발생하는 문제점을 에포다이드드 브래그 격자 구조를 도입하여 해결할 수 있을 것이다.

### V. 결 론

본 논문에서는 폴리머 광도파로 제작 공정과 호환 가능하며 간편한 웨도우 마스크 제작 방법을 제안하고 이를 이용하여 격자의 깊이가 파동의 진행방향에 따라 서서히 변화하는 에포다이드드 브래그 격자를 제작하는 공정 방법을 제안하였다. 100%의 반사율을 가지며 0.4 nm의 3-dB 대역폭과 1 nm의 20-dB 대역폭을 가지는 에포다이드드 브래그 격자를 설계하였으며 격자 길이는 15 mm, 격자 깊이는 150 nm로 설계하였다. 18 mm의 격자 길이를 가지는 균일 브래그 격자의 경우 100%의 반사율을 가지며 0.14 nm의 3-dB 대역폭과 1.01 nm의 20-dB 대역폭 특성을 가짐을 확인하였다. 동일한 격자 길이를 가지는 에포다이드드 브래그 격자는 95%의 반사율을 가지며 0.28 nm의 3-dB 대역폭과 0.70 nm의 20-dB 대역폭을 가짐을 확인하였다. 이를 통해 에포다이드드 격자 구조를 이용하여 대역폭의 크기를 줄일 수 있음을 확인하였으며 side-lobe의 증가로 인한 인접 채널간의 신호 누화가 발생하는 문제점을 에포다이드드 격자 구조를 도입함으로 인해 해결할 수 있음을 확인하였다.

### 감사의 글

이 논문은 한국연구재단 도약과제 (2014-051994) 연구비 지원과, 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)의 지원으로 수행되었습니다.

### References

1. 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).
2. D. Sadot and E. Boimovich, "Tunable optical filters for dense WDM networks," *IEEE Commun. Mag.* **36**, 50-55 (1998).

3. Y. J. Rao, "Recent progress in applications of in-fibre Bragg grating sensors," *Opt. Laser. Eng.* **31**, 297-324 (1999).
4. T. L. Yeo, T. Sun, and K. T. V. Grattan, "Fibre-optic sensor technologies for humidity and moisture measurement," *Sens. Actuators A-Phys.* **144**, 280-295 (2008).
5. A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick, M. LeBlanc, K. P. Koo, G. G. Askins, M. A. Putnam, and E. J. Friebele, "Fiber grating sensors," *J. Lightwave Technol.* **15**, 1442-1463 (1997).
6. L. Domash, M. Wu, N. Nemchuk, and E. Ma, "Tunable and switchable multiple-cavity thin film filters," *J. Lightwave Technol.* **22**, 126-135 (2004).
7. M. Lequime, R. Parmentier, F. Lemarchand, and C. Amra, "Toward tunable thin-film filters for wavelength division multiplexing applications," *Appl. Opt.* **41**, 3277-3284 (2002).
8. R. Parmentier and M. Lequime, "Substrate-strain-induced tunability of dense wavelength-division multiplexing thin-film filters," *Opt. Lett.* **28**, 728-730 (2003).
9. B. Yu, G. Pickrell, and A. Wang, "Thermally tunable extrinsic Fabry-Perot filter," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16**, 2296-2298 (2004).
10. S. Milne, J. M. Dell, A. J. Keating, and L. Faraone, "Widely tunable MEMS-based Fabry-Perot filter," *J. Microelectromech. Syst.* **18**, 905-908 (2009).
11. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick, M. LeBlanc, K. P. Koo, G. G. Askins, M. A. Putnam, and E. J. Friebele, "Fiber grating sensors," *J. Lightwave Technol.* **15**, 1442-1463 (1997).
12. A. Iocco, H. G. Limberger, R. P. Salathé, L. A. Everall, K. E. Chisholm, J. A. R. Williams, and I. Bennion, "Bragg grating fast tunable filter for wavelength division multiplexing," *J. Lightwave Technol.* **17**, 1217-1221 (1999).
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. D. Sadot and E. Boimovich, "Tunable optical filters for dense WDM networks," *IEEE Commun. Mag.* **36**, 50-55 (1998).
15. J. Singh, A. Khare, and S. Kumar, "Design of gaussian apodized fiber Bragg grating and its applications," *Int. J. Eng. Sci. and Technol.* **2**, 1419-1424 (2010).
16. S. F. Zhou, L. Reekie, H. P. Chan, K. M. Luk, and Y. T. Chow, "Apodization of terahertz Bragg gratings in sub-wavelength polymer fiber," *Opt. Lett.* **38**, 2807-2809 (2013).