

## Two-Wavelength Lasers Based on Oversized Rib Polymer Waveguide Bragg Reflectors

Chi-Hun Sung<sup>1</sup>, Jun-Whee Kim<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 December 30, 2013; Revised manuscript February 3, 2014; Accepted February 3, 2014)

An external cavity laser supporting two wavelengths is demonstrated by incorporating polymer waveguide Bragg reflectors and a superluminescent light-emitting diode. An oversized rib waveguide structure and Bragg gratings are designed by using the effective-index and transmission-matrix methods. Bragg gratings with different periods are inscribed on a polymer waveguide through double-exposure laser interferometry. In order to tune the cavity loss affected by the reflectivity of Bragg gratings, a Bragg reflectors with varying length is incorporated. Two-wavelength-mode lasing is achieved for the device consisting of 2-mm long, 537-nm period gratings and 2.2-mm long, 540-nm period gratings; the lasing wavelengths are 1554 nm and 1564 nm, with an output power close to 0 dBm, a 20-dB bandwidth of 0.2 nm, and a side-mode suppression ratio of 45 dB.

Keywords: Polymeric optical waveguide, Bragg reflection grating, External cavity laser, Multi-wavelength laser  
OCIS codes: (130.5460) Polymer waveguides; (230.1480) Bragg reflectors; (140.3070) Infrared and far-infrared lasers; (140.3460) Lasers

## 대형 립 폴리머 광도파로 브래그 격자를 이용한 두 파장 레이저

성치훈<sup>1</sup> · 김준휘<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

(2013년 12월 30일 받음, 2014년 2월 3일 수정본 받음, 2014년 2월 3일 게재 확정)

두 파장 레이저를 구현하기 위해서 폴리머 광도파로 브래그 격자와 초발광 LED로 구성된 외부 공진 구조의 레이저를 제작하였다. 대형 립(oversized rib) 구조의 광도파로와 폴리머 광도파로 브래그 격자는 각각 유효굴절률법과 전송행렬법을 이용하여 설계하였으며, 서로 다른 격자 주기를 가지는 폴리머 광도파로 브래그 격자는 이중 노광 레이저 간섭법을 이용하여 제작하였다. 브래그 격자의 반사율 변화에 따른 외부 공진 레이저의 특성을 보기 위해 2 mm의 고정된 길이를 가지며 537 nm의 주기를 갖는 브래그 격자와 0.5 mm에서 6 mm까지 여러 가지 길이를 가지며 540 nm의 주기를 갖는 브래그 격자를 제작하였다. 격자 주기가 537 nm와 540 nm인 브래그 격자의 길이가 각각 2 mm와 2.2 mm일 때 제작된 두 파장 레이저는 1554 nm 파장과 1564 nm 파장에서 0 dBm에 가까운 출력 파워를 보이며, 45 dB이상의 SMSR(side mode suppression ratio)와 0.2 nm의 20-dB 대역폭 특성을 가짐을 확인하였다.

Keywords: 폴리머 광도파로, 브래그 반사 격자, 외부 공진 레이저, 두 파장 레이저  
OCIS codes: (130.5460) Polymer waveguides; (230.1480) Bragg reflectors; (140.3070) Infrared and far-infrared lasers; (140.3460) Lasers

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

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

## I. 서 론

하나의 레이저 소자에서 여러 개의 파장이 출력 가능한 다 파장 레이저(Multi-wavelength laser)는 WDM 통신 시스템<sup>[1, 2]</sup>, 테라헤르츠 신호 생성<sup>[3-6]</sup>, 광 센서<sup>[7]</sup> 등과 같은 여러 응용분야에 다양하게 적용되고 있다. 다파장 레이저를 구현하기 위한 방법으로 어븀 첨가 광섬유와 브래그 격자를 이용한 방법<sup>[3, 8, 9]</sup>이 제안되었으나, 인접한 파장간에 나타나는 이득 경쟁(gain competition)으로 인해 안정적인 레이저를 구현하기가 어려운 단점이 있다. 다파장 레이저를 구현하기 위해 제안된 또 다른 방법은 반도체 광증폭기와 arrayed waveguide grating을 결합하여 다파장 레이저를 구현하는 방법<sup>[1, 2]</sup>, 파장 가변 레이저와 고정 파장의 DFB(distributed feedback laser)를 이용하는 방법<sup>[5]</sup>, DFB와 distributed Bragg reflector를 이용하는 방법<sup>[6]</sup> 등이 제안되었다.

한편, 폴리머를 이용한 광도파로 소자는 기존의 실리카 기반 광소자들에 비해 제작이 용이하고 집적화가 쉽고 대량생산이 가능하다는 장점을 가지고 있으며 높은 열 광학계수로 인해 넓은 파장 가변이 가능하므로 소형 저가의 소자 개발에 적합하다. 이러한 폴리머의 장점을 이용하여 폴리머 브래그 격자를 제작하고 폴리머의 높은 열광학 계수를 이용하여 소형 저가의 파장 가변 필터를 구현한 연구 결과가 발표되었으며 이득 매질과 외부 공진 구조를 형성하여 파장 가변 레이저를 구현한 결과도 발표되었다<sup>[10-13]</sup>.

본 논문에서는 폴리머 광도파로와 브래그 격자를 집적하여 두 파장 폴리머 광도파로 브래그 격자 소자를 제작한 후 이득 매질인 SLED(Super luminescent light emitting diode)와 연결하여 외부 공진 구조의 두 파장 레이저를 구현하였다. 유효굴절률법과 전송행렬법을 이용하여 대형 립 구조의 폴리머 광도파로와 브래그 격자를 각각 설계하였다. 시뮬레이션을 통해 설계된 브래그 격자의 깊이와 길이의 변화에 따른 반사율의 변화를 살펴보았다. 브래그 격자의 반사율 변화에 따른 두 파장 레이저의 특성을 확인하기 위해 길이가 고정된 브래그 격자와 여러 가지 길이를 가지는 브래그 격자를 함께 제작하고 브래그 격자의 여러 가지 길이에 따른 두 파장 레이저의 파장 특성에 대해 살펴보았다. 또한 제안한 두 파장 레이저의 파장 안정성을 확인하기 위해 시간에 따른 두 파장 레이저의 출력특성에 대하여 살펴보았다.

## II. 두 파장 폴리머 광도파로 브래그 격자 소자 설계

본 연구에서 제안하는 두 파장 레이저는 그림 1과 같이 한 쪽 면이 고반사 코팅 처리된 SLED와 폴리머 브래그 격자 광도파로를 연결하여 외부 공진 구조를 가지도록 구성하였다. 넓은 파장 영역을 가지는 SLED에서 나온 빛은 폴리머 브래그 격자에 의해 특정 파장만 반사되고 반사된 빛은 다시 한 쪽 면이 고반사 처리된 SLED로 feedback 되어 외부 공진기를 형성하게 된다.

폴리머 광도파로의 코어와 클래딩으로 ChemOptics 사의 저손실 폴리머인 ZPU13-455( $n=1.455 @1550 \text{ nm}$ )와 ZPU13-430( $n=1.430 @1550 \text{ nm}$ )을 이용하였다. 브래그 격자의 경우 코어와 클래딩의 굴절률 차이가 커질수록 격자의 깊이가 동일

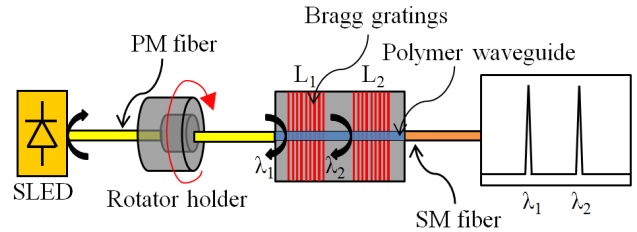


FIG. 1. Schematic diagram of external cavity two wavelength laser consisting of the polymer waveguide Bragg reflectors and the SLED with a high reflection coating on one end.

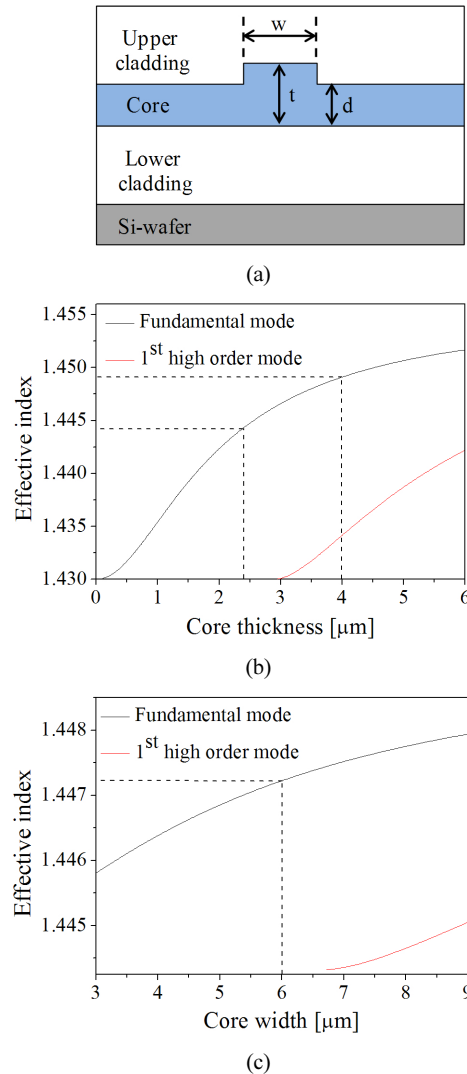


FIG. 2. Design of the single mode oversized rib polymer waveguide: (a) cross-section of the oversized rib polymer waveguide, (b) Effective indices as a function of core thickness, (c) Effective indices as a function of core width.

하더라도 더 높은 반사율을 얻을 수 있다. 하지만 코어와 클래딩 간의 굴절률 차이가 커지게 되면 단일 모드로 동작하는 광도파로의 크기는 작아지게 되고 이로 인해 입, 출력 부분에서 광섬유와의 mode size mismatch로 인한 결합 손실이 증가하게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 큰 굴절률 차이를 가지면서도 광도파로 코어의 단면적을 넓히기 위한 방법으로 대형 립(oversized rib) 구조가 제안되었다<sup>[4]</sup>. 본 논문에서도 이 구조를 적용하였으며 광도파로의 단면 구조는 그림 2(a)와 같다.

단일모드로 동작하는 대형 립 구조의 폴리머 광도파로를 설계하기 위해 유효굴절률법(Effective index method)을 이용하였다. 코어의 두께  $t$ 에 따른 유효굴절률 변화를 그림 2(b)에 나타내었다.  $t$ 가 4.0  $\mu\text{m}$ 인 경우 수직방향으로 다중모드로 동작하며 2.4  $\mu\text{m}$ 인 경우 단일모드로 동작한다.  $t$ 가 4.0  $\mu\text{m}$ 인 경우 1차 고차 모드의 유효굴절률은  $t$ 가 2.4  $\mu\text{m}$ 인 경우의 기본모드 유효굴절률보다 낮기 때문에 측면 코어의 두께  $d$ 를 2.4  $\mu\text{m}$ 로 설계하면 1차 고차모드는 측면 코어로 빠져나가게 된다. 이 때 코어와 측면 코어의 유효굴절률은 각각 1.4491

과 1.44432이며 유효굴절률 차이( $\Delta N_{\text{eff}}$ )는 0.00478이다. 대형 립 도파로의 폭을 결정하기 위해 코어와 측면 코어의 유효굴절률을 이용하여 코어의 폭  $w$ 의 변화에 따른 유효 굴절률의 변화를 그림 2(c)에 나타내었다. 폭이 6.0  $\mu\text{m}$ 인 경우 대형 립 구조의 광도파로는 단일모드로 동작하며 이 때 유효굴절률은 1.44722이다. 최종적으로 설계된 대형 립 광도파로의 코어 두께  $t$ 는 4.0  $\mu\text{m}$ , 코어 폭  $w$ 는 6.0  $\mu\text{m}$ , 측면 코어의 두께  $d$ 는 2.4  $\mu\text{m}$ 이다.

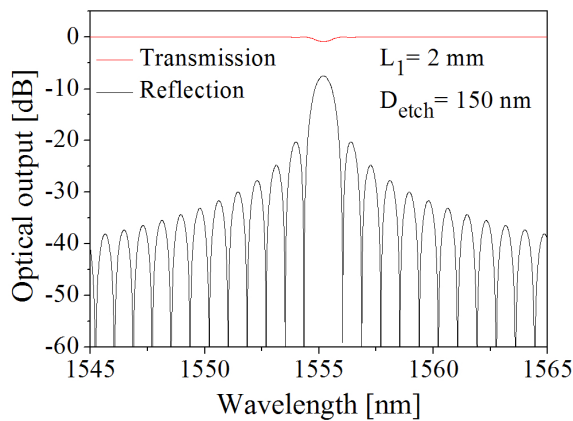
브래그 격자에서 반사되는 파장,  $\lambda_B$  는 식 (1)과 같이 주어진다.

$$m\lambda_B = 2N_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

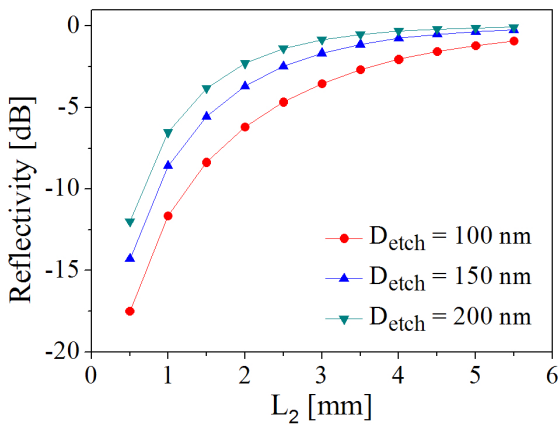
여기서  $m$ 은 브래그 격자의 차수를,  $N_{\text{eff}}$ 는 광도파로의 유효굴절률을,  $\Lambda$ 은 브래그 격자의 주기를 나타낸다. 전송행렬법(transmission matrix method)을 이용하여 1차 브래그 격자를 설계하였으며 반사 파장이 각각  $\lambda_1=1555 \text{ nm}$ ,  $\lambda_2=1565 \text{ nm}$ 가 되도록 브래그 격자의 주기를  $\Lambda_1=537 \text{ nm}$ ,  $\Lambda_2=540 \text{ nm}$ 로 설계하였다.  $\lambda_1$ 의 반사 파장을 가지는 브래그 격자의 반사, 투과 스펙트럼은 그림 3(a)와 같으며 격자 길이  $L_1$ 이 2 mm, 격자깊이  $D_{\text{etch}}$ 가 150 nm일 때 반사율은 35%가 됨을 확인하였다.  $\lambda_2$ 의 반사 파장을 가지는 브래그 격자의 경우 여러 가지 길이에 대한 반사율의 변화를 확인하기 위해  $L_2$ 의 변화에 따른 반사율의 변화를 그림 3(b)에 나타내었다.  $L_2$ 가 길어질수록 반사율이 증가하는 것을 알 수 있으며 동일한  $L_2$ 를 가지더라도  $D_{\text{etch}}$ 가 커질수록 반사율이 증가하는 것을 알 수 있다.

### III. 두 파장 폴리머 광도파로 브래그 격자 제작 및 특성 측정

폴리머 광도파로 브래그 격자를 제작하기 위한 공정은 그림 4와 같다. Si 기판과 하부 클래딩 물질간의 접착력을 향상시키기 위해 ZAP1020 adhesion promoter를 코팅한 뒤 8  $\mu\text{m}$  두께의 하부 클래딩 층을 형성하기 위해 ZPU13-430 폴리머를 1000 rpm, 30초간 코팅한다. UV 세기가 5  $\text{mW}/\text{cm}^2$ 이며 피크 파장이 370 nm인 UV 챔버를 이용하여 질소 환경을

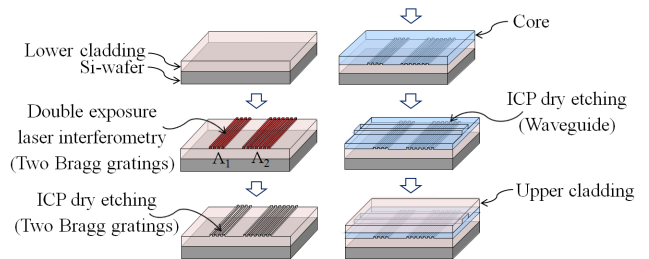


(a)



(b)

**FIG. 3.** Characteristics of the polymer waveguide Bragg reflectors: (a) Reflection and transmission spectra with  $L_1=2 \text{ mm}$  and  $D_{\text{etch}}=150 \text{ nm}$ , (b) Reflectivity as a function of  $L_2$  for various etch depths,  $D_{\text{etch}}$ .



**FIG. 4.** Schematic fabrication procedures of the polymer waveguide Bragg reflectors. The device consists of the oversized rib waveguide and two Bragg gratings with different gratings period.

유지하면서 5분간 경화시킨다. 브래그 격자를 제작하기 위해 하부 클래딩 층 위에 g-line photoresist인 TSMR을 두께가 200 nm가 되도록 cyclohexanone과 1:2 비율로 희석한 후 1000 rpm, 30초간 코팅한다. He-Cd laser(KIMMON, 442 nm) 광원을 이용한 laser interferometry method를 이용하여 브래그 격자를 제작한다. 레이저 간섭법은 두 개의 평면파를 교차시켜 간섭현상에 의해 나타나는 정상파를 photoresist에 감광하여 주기적인 격자 구조를 형성시키는 것이다. 먼저 2 mm의 고정된 길이를 가지는  $\lambda_1$  파장의 브래그 격자 패턴을 photoresist의 특정 부분에 감광시킨 후 그 영역을 shadow masking하고 여러 가지 길이를 가지는  $\lambda_2$  파장의 브래그 격자 패턴을 감광시킨다.

O<sub>2</sub> 플라즈마를 이용하여 photoresist에 형성된 주기가 다른 두 브래그 격자 패턴을 하부 클래딩에 전사하여 브래그 격자를 완성한다. 제작된 브래그 격자 위에 4.0  $\mu\text{m}$  두께의 코어층을 형성하기 위하여 ZPU13-455 물질을 2500 rpm, 30초 코팅하고 5분간 UV 경화한다. 경화된 코어층에 AZ5214 photoresist를 이용하여 광도파로 패턴을 감광시킨 후 O<sub>2</sub> 플라즈마를 이용하여 측면 코어를 1.6  $\mu\text{m}$  깊이로 식각해 대형

립 구조의 광도파로 코어층을 완성한다. 완성된 코어층 위에 ZPU13-430을 1000 rpm, 30초 코팅하고 UV 경화를 통해 상부 클래딩 층을 형성하여 폴리머 광도파로 브래그 격자를 완성한다. 제작된 두 파장 폴리머 광도파로 브래그 격자의 파장 특성을 측정하기 위해 브래그 격자에서 반사되어 돌아오는 빛을 OSA(optical spectrum analyzer)로 측정하였으며 그림 5와 같은 스펙트럼 결과를 확인하였다.

측정된 브래그 격자의 반사 파장은 각각  $\lambda_1=1554 \text{ nm}$ ,  $\lambda_2=1564 \text{ nm}$  이다.  $L_1$ 이 2 mm인  $\lambda_1$  파장의 브래그 격자 반사율은 약 35 %이며, 0.5 mm에서 6 mm까지 여러 가지 길이를 가지는  $\lambda_2$  파장의 브래그 격자는  $L_2$ 가 길어질수록 반사율이 커지는 것을 알 수 있다. 제작된 폴리머 광도파로 브래그 격자의 식각 깊이를 확인하기 위해 여러 가지 길이에 따라 측정된 브래그 격자의 반사율과 격자의 식각 깊이가 100, 150, 200 nm 인 경우 계산된 반사율과 비교하여 그림 5(b)에 나타내었다. 이를 통해 제작된 브래그 격자는 150 nm의 격자 깊이를 가지는 브래그 격자의 여러 가지 길이에 대한 반사율의 변화와 유사한 것을 알 수 있다

#### IV. 외부 공진 두 파장 레이저 특성 측정 결과

대형 립 구조의 폴리머 광도파로 브래그 격자와 중심파장이 1535 nm, 3-dB 대역폭이 50 nm인 SLED를 이용하여 외부 공진 구조의 두 파장 레이저를 구현하였으며 OSA를 이용하여 파장 특성을 측정하였다. SLED의 PM fiber를 통해 진행하는 광원의 편광을 rotator holder를 이용하여 TE 편광이 되도록 한 후  $L_2$ 의 변화에 따른 두 파장 레이저의 출력 특성을 측정하였으며 그림 6과 같은 스펙트럼 결과를 확인할 수 있었다.  $L_2=1.5 \text{ mm}$ 인 경우, 반사율이 더 큰  $L_1=2 \text{ mm}$ 인 브래그 격자와의 이득경쟁으로 인해  $\lambda_2$  파장에서 출력 파워가 나오지 않으나  $L_2=2.2 \text{ mm}$ 인 경우, 비슷한 레이저 출력 파워가 나오는 것을 확인할 수 있다. 이 때,  $\lambda_1$ 과  $\lambda_2$  파장에서 출력 파워는 각각 -0.53 dBm, -1.32 dBm이며 SMSR은 45 dB 이상이고 0.2 nm의 20-dB 대역폭 특성을 가지는 것을 확인할 수 있었다.  $L_2=4 \text{ mm}$ 인 경우,  $\lambda_1$  파장의 브래그 격자는 이득경쟁으로 인해 레이저 출력이 되지 못하고  $\lambda_2$  파장에 대해서만 출력 파워가 나오는 것을 확인하였다.

두 파장 레이저의 파장 안정성(stability)을 확인하기 위해  $L_2=2.2 \text{ mm}$ 인 경우에 대해 시간의 변화에 따른 두 파장 레이저의 출력 파워와 파장의 변화를 30분 동안 관찰하여 그 결과를 그림 7에 나타내었다. 레이저의 출력 파장은 변화가 없지만 출력 파워는 시간에 따라 fluctuation되는 것을 확인하였다. 두 파장 레이저의 출력 파워가 안정하게 유지 되지 못하고 fluctuation하는 원인은 broadband light source인 SLED의 이득 특성이 homogeneous line broadening에 의해 결정되어서 인접한 두 파장간에 이득 경쟁이 발생하기 때문이다. 이런 문제점을 해결하기 위해서는 개별적인 원자들의 이득 특성이 독립적으로 작용하여 inhomogeneous line broadening이 주도적으로 작용하는 이득 매질을 이용해 이득 경쟁을 줄

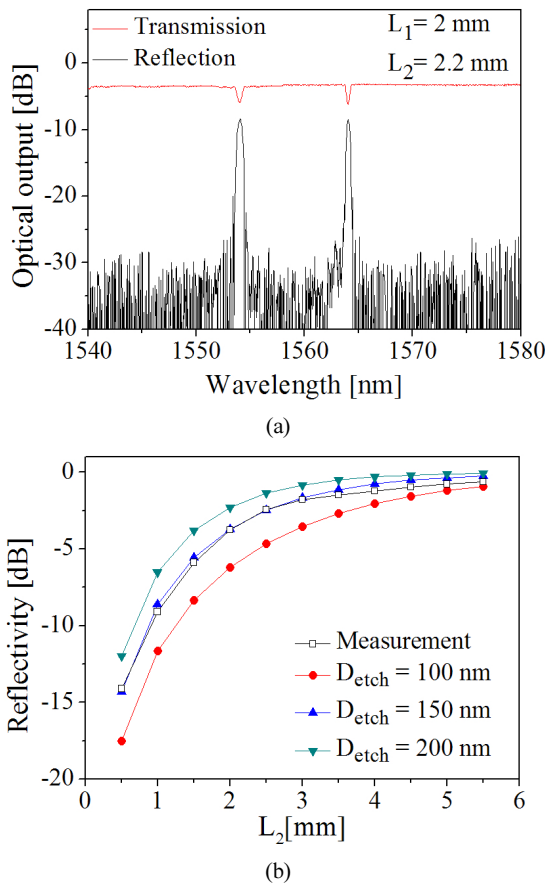
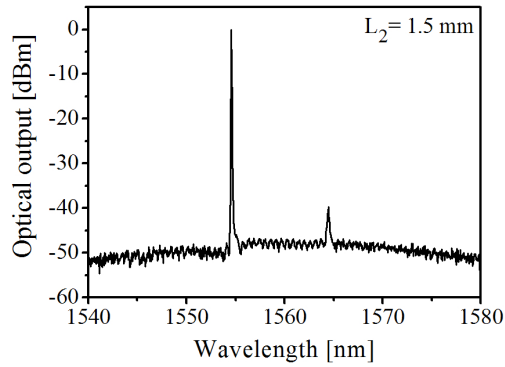
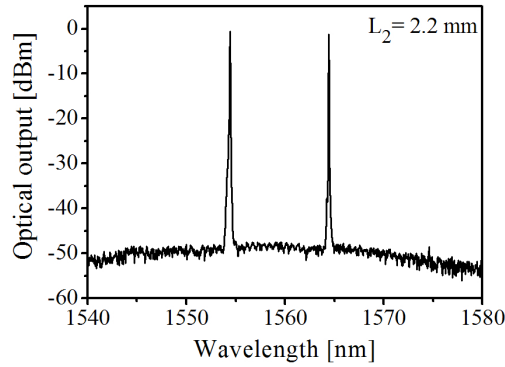


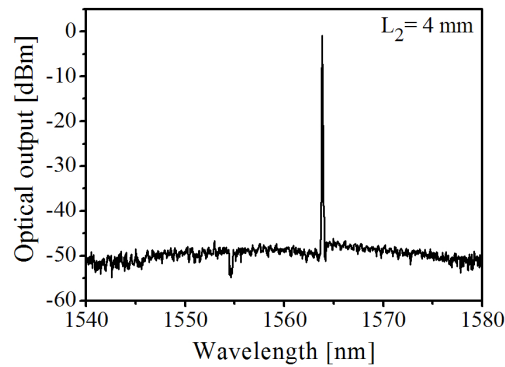
FIG. 5. Characteristics of fabricated two wavelength polymer waveguide Bragg reflectors: (a) Reflection and transmission spectra with  $L_1=2 \text{ mm}$  and  $L_2=2.2 \text{ mm}$ . (b) Comparison of the reflectivity of fabricated polymer waveguide Bragg reflectors to the calculation results.



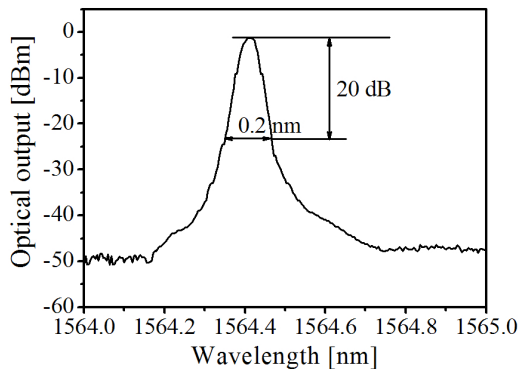
(a)



(b)

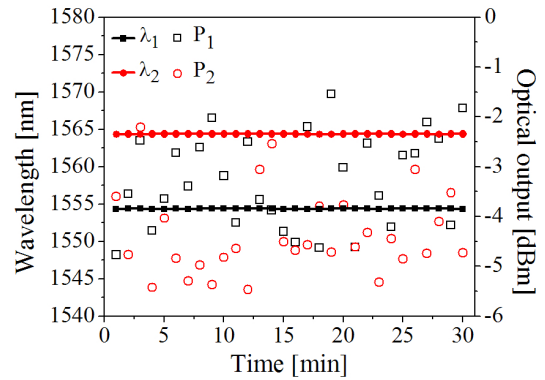


(c)



(d)

**FIG. 6.** Lasing spectra of the two wavelength laser when  $L_1$  is fixed as 2 mm and  $L_2$  is various as (a) 1.5 mm, (b) 2.2 mm, and (c) 4 mm, respectively; (d) The enlarged spectrum to measure the spectral bandwidth in optical spectrum analyzer.



**FIG. 7.** Stability of two wavelength laser as a function of time. The output wavelength of laser is stable but the output power is not stable. The power fluctuation is about 3 dB.

여주게 되면 안정적인 광출력을 유지하는 두 파장 레이저를 구현할 수 있을 것이다.

## V. 결 론

본 논문에서는 서로 다른 두 개의 격자 주기를 가지는 폴리머 광도파로 브래그 격자를 설계, 제작하고 반사형 SLED와 연결하여 외부 공진 구조의 두 파장 레이저를 구현하였다.  $\lambda_1=1555$  nm,  $\lambda_2=1565$  nm 파장에서 브래그 반사 조건을 만족하도록  $\Lambda_1=537$  nm,  $\Lambda_2=540$  nm의 주기를 가지는 브래그 격자를 설계 하였다. 제작된 브래그 격자의 반사 파장은 각각  $\lambda_1=1554$  nm,  $\lambda_2=1564$  nm였다.  $L_1=2$  mm,  $L_2=2.2$  mm인 경우,  $\lambda_1$ 과  $\lambda_2$  파장에서 두 파장 레이저의 출력 파워는 각각 -0.53 dBm, -1.32 dBm이며 45 dB이상의 SMSR과 0.2 nm의 20-dB 대역폭 특성을 가짐을 확인하였다. 그러나 제안한 두 파장 레이저는 광출력을 높이면 이득경쟁으로 인해 출력파워가 불안정해지는 문제점을 지니고 있었으며, 이를 해결하기 위해서는 inhomogeneous line broadening이 주도적으로 작용하는 이득 매질을 이용하는 것이 바람직할 것으로 보인다.

## 감사의 글

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

## References

1. K. Lawniczuk, R. Piramidowicz, P. Szczepanski, P. J. Williams, M. J. Wale, M. K. Smit, and X. J. M. Leijtens, "8-channel AWG-based multiwavelength laser fabricated in a multi-project wafer run," in Proc. 23rd International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (Berlin, Germany, May 2011), pp. 1-4.
2. G. kurczveil, M. J. R. Heck, D. Peters, J. M. Garcia, D.



- Spencer, and J. E. Bowers, "An integrated hybrid silicon multiwavelength AWG laser," *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.* **17**, 1521-1527 (2011).
3. M.-Y. Jeon, N.-J. Kim, J.-H. Shin, J.-S. Jong, S.-P. Han, C.-W. Lee, Y.-A. Leem, D.-S. Yee, H.-S. Chun, and K.-H. Park, "Widely tunable dual-wavelength Er<sup>3+</sup>-doped fiber laser for tunable continuous-wave terahertz radiation," *Opt. Express* **18**, 12291-12297 (2010).
  4. A. J. Deninger, T. Göbel, D. Schönherr, T. Kinder, A. Roggenbuck, M. Köberle, F. Lison, T. Müller-Wirts, and P. Meissner, "Precisely tunable continuous-wave terahertz source with interferometric frequency control," *Rev. Sci. Instrum.* **79**, 044702 (2008).
  5. M.-Y. Jeon, N.-J. Kim, S.-P. Han, H.-S. Ko, H.-C. Ryu, D.-S. Lee, and K.-H. Park, "Rapidly frequency-swept optical beat source for continuous wave terahertz generation," *Opt. Express* **19**, 18364-18371 (2011).
  6. N.-J. Kim, S.-P. Han, H.-C. Ryu, H.-S. Ko, J.-W. Park, D.-H. Lee, M.-Y. Jeon, and K.-H. Park, "Distributed feedback laser diode integrated with distributed Bragg reflector for continuous-wave terahertz generation," *Opt. Express* **20**, 17496-17502 (2012).
  7. Y.-G. Han, T. V. A. Tran, S.-H. Kim, and S.-B. Lee, "Multiwavelength raman-fiber-laser-based long-distance remote sensor for simultaneous measurement of strain and temperature," *Opt. Lett.* **30**, 1282-1284 (2005).
  8. C. H. Yeh, F. Y. Shih, C. H. Wang, C. W. Chow, and S. Chi, "Tunable and stable single-longitudinal-mode dual wavelength erbium fiber laser with 1.3 nm mode spacing output," *Laser Phys. Lett.* **11**, 821-824 (2008).
  9. X. Liu, X. Yang, F. Lu, J. Ng, X. Zhou, and C. Lu, "Stable and uniform dual-wavelength erbium-doped fiber laser based on fiber Bragg gratings and photonic crystal fiber," *Opt. Express* **13**, 142-147 (2005).
  10. N.-S. Son, K.-J. Kim, J.-W. Kim, and M.-C. Oh, "Near-infrared tunable lasers with polymer waveguide Bragg gratings," *Opt. Express* **20**, 827-834 (2012).
  11. K.-J. Kim, M.-C. Oh, S.-R. Moon, and C.-H. Lee, "Flexible polymeric tunable lasers for WDM passive optical networks," *J. Lightwave Technol.* **31**, 982-987 (2013).
  12. J.-W. Kim, K.-J. Kim, N.-S. Son, and M.-C. Oh, "Strain-imposed external cavity tunable lasers operating for NIR wavelength," *J. Opt. Soc. Korea* **17**, 172-176 (2013).
  13. S.-H. Oh, K.-H. Yoon, K.-S. Kim, J.-B. Kim, O.-K. Kwon, D.-K. Oh, Y.-O. Noh, J.-K. Seo, and H.-J. Lee, "Tunable external cavity laser by hybrid integration of a superluminescent diode and a polymer Bragg reflector," *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.* **17**, 1534-1541 (2011).
  14. R. Moosburger and K. Petermann, "4 × 4 digital optical matrix switch using polymeric oversized rib waveguides," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **10**, 684-686 (1998).