

Characterization of a Wavelength-Tunable Fiber Laser Based on a Polymer Waveguide Bragg Grating Wavelength Filter

Byeong Kwon Choi^{1,2}, Jong Hyun Byun^{1,3}, Jun Gyu Seo², Hak Kyu Lee², and Min Yong Jeon^{1†}

¹Department of Physics, Chungnam National University, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34134, Korea

²Chemoptics Incorporated, 261 Techno 2-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34026, Korea

³FiberPro Incorporated, 26-55 Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34113, Korea

(Received July 27, 2015; Revised manuscript September 30, 2015; Accepted October 12, 2015)

We report the characteristics of a single-wavelength-tunable fiber laser using a polymer waveguide Bragg grating (PWBG) wavelength filter. The output of the laser depends on environmental conditions, such as temperature and polarization states in the laser cavity. Wavelength tuning can be achieved, about 16.29 nm from 1548.24 nm to 1531.95 nm, according to the electric power applied to the PWBG wavelength filter. The achieved efficiency slope is about -0.16 nm/mW. A side-mode suppression ratio (SMSR) of more than 35 dB can be obtained by adjusting the polarization state in the laser cavity. A stable wavelength-tunable fiber laser can be achieved using the PWBG wavelength filter with a TEC module and a polarization-maintaining fiber.

Keywords: Wavelength tunable laser, Polymeric optical waveguide, Wavelength filter, Fiber laser

OCIS codes: (140.3460) Lasers; (140.3510) Lasers, fiber; (130.5460) Polymer waveguides

폴리머 도파로 브라그 격자를 이용한 단일 파장 가변 광섬유 레이저의 출력 특성 연구

최병권^{1,2} · 변종현^{1,3} · 서준규² · 이학규² · 전민용^{1†}

¹충남대학교 물리학과

☎ 34134 대전광역시 유성구 대학로 99

²㈜켄옵틱스

☎ 34026 대전광역시 유성구 테크노 2로 261

³㈜파이버프로

☎ 34113 대전광역시 유성북로 26-55

(2015년 7월 27일 받음, 2015년 9월 30일 수정본 받음, 2015년 10월 12일 게재 확정)

본 논문은 폴리머 광 도파로 기반의 브라그 격자(Polymer waveguide Bragg grating: PWBG) 파장 필터를 광섬유 레이저 공진기 내부에 삽입하여 단일 파장 가변 레이저를 구현하고, 주위 온도 및 공진기 내부의 편광 상태의 변화에 대한 출력 특성을 연구한 결과에 대해 보고한다. 레이저 공진기 내부에 있는 PWBG 파장 필터에 0 mW에서 100 mW의 전력을 인가해 주었을 때 레이저에서 발진하는 파장은 1548.24 nm에서 1531.95 nm까지 약 16.29 nm를 가변할 수 있었으며, 이 때 slope efficiency는 약 -0.16 nm/mW였다. 레이저 공진기 안의 편광을 적절하게 조절하면 모든 파장 가변 범위에서 35 dB 이상의 SMSR(side mode suppression ratio)을 얻을 수 있었다. 레이저 공진기 외부의 온도가 변화하면 발진하는 파장이 변하는 것을 알 수 있었다. 따라서 PWBG 파장 필터를 이용하여 안정된 파장 가변 레이저를 구현하기 위해서는 PWBG 파장 필터의 온도 안정화가 필요하며, 또한 편광에 대한 영향을 최소화하기 위해서는 레이저 공진기를 편광유지 광섬유로 구성해야 한다.

Keywords: 파장 가변 레이저, 폴리머 광 도파로, 파장 필터, 광섬유 레이저

OCIS codes: (140.3460) Lasers; (140.3510) Lasers, fiber; (130.5460) Polymer waveguides

†E-mail: myjeon@cnu.ac.kr

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

I. 서 론

폴리머(Polymer)를 기반으로 제작한 광 도파로 소자는 광 통신 및 광섬유 센서 분야에서 파장 다중화기, 광 분배기, 광 감쇠기, 광 스위치, 광 변조기, 파장 변환기 등 다양한 소자로 응용되고 있다.^[1-7] 특히 폴리머 소재를 사용하면 기존의 실리카 기반 광 소자에 비해 공정의 집적화가 쉽고 대량 생산이 가능한 장점을 가지고 있다. 이러한 장점을 이용하여 폴리머 기반의 광 도파로에 브래그 격자를 만들어 주면 파장 선택성 소자로 이용할 수 있다. 일반적으로 파장 선택성 소자로서 널리 사용하는 광소자 중 하나가 광섬유 브래그 격자(Fiber Bragg Grating: FBG)이다.^[8] FBG는 광섬유 코어 안에 주기적인 굴절률 변화를 유도하여 제작하며, 제작된 FBG에 넓은 스펙트럼을 갖는 광대역 광원(broadband optical source)을 입사시키면 브래그 조건에 맞는 특정 파장이 반사되고, 이러한 특성을 이용하여 파장 선택성 소자로 이용한다. FBG를 광섬유 레이저 공진기 안에 삽입하면 특정 파장에 대해 반사하는 성질이 있어서 이 파장에 대해 반사 거울(reflector)로 이용할 수 있다. 이때 FBG에 스트레인을 가해주면 브래그 조건이 바뀌어 반사 파장이 바뀌게 되는 특성으로 반사되는 파장을 가변시켜 줄 수 있기 때문에 파장 가변 레이저로 구현할 수 있다^[9-11]. FBG를 이용한 파장 가변은 범위가 넓지 않으며, 전기 신호로 파장 가변을 할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 반면, 폴리머 광 도파로 기반의 브래그 격자(Polymer Waveguide Bragg Grating: PWBG)는 폴리머의 우수한 열 광학(thermo-optic) 효과를 이용하기 때문에 파장 선택의 범위가 넓고, 파장 가변에 소요되는 소비 전력이 낮으며, 전기적 신호로 파장 가변을 할 수 있다는 장점을 가지고 있다^[12-15]. 최근에 PWBG 파장 필터를 이득 매질과 결합하여 단일 파장 가변 레이저와 두 개의 PWBG 파장 필터를 레이저 공진기 안에 삽입하여 파장 가변 두 파장 레이저를 구현한 결과가 발표되었다^[15, 16]. PWBG 필터는 열광학 효과를 이용하기 때문에 외부 온도 변화에 따라 반사 파장이 변할 수 있으며, 편광에 따른 파장 변화도 나타나게 된다. 본 논문에서는 레이저의 이득 매질로서 반도체 광 증폭기(Semiconductor Optical Amplifier: SOA)를 사용하고, 파장 가변을 위한 광소자로 PWBG 파장 필터를 레이저 공진기 내부에 삽입하여 단일 파장 가변 광섬유 레이저를 구현한 결과를 보고한다. 레이저 공진기 주위의 온도변화와 레이저 공진기 안의 편광 변화에 따른 발진 파장의 변화를 측정하였고, 파장 가변에 따른 각 발진 파장에서의 선폭을 측정하였으며, 레이저 공진기 안의 편광을 최적화 하였을 때의 선폭을 측정하여 비교 분석하였다.

II. 실험 및 결과

2.1. PWBG 필터의 광 특성

폴리머를 기반으로 제작한 광 도파로 소자는 열-광학 효과를 이용하며, 파장 필터로 사용하기 위해서는 주위의 온도 변화나 편광 특성, 파장 가변 특성 등을 포함한 여러 가지

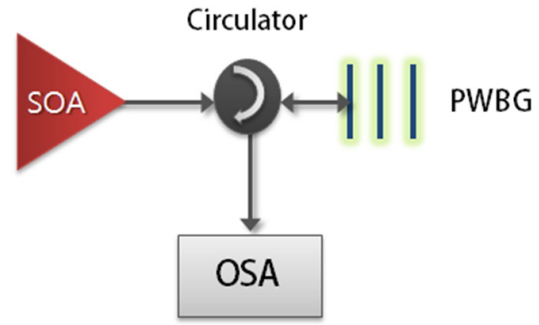


FIG. 1. Experimental setup for characterization of the PWBG filter.

광학적 특성을 측정해야 한다. 본 연구에서 사용한 PWBG 파장 필터는 (주) 캠옵틱스에서 받은 필터로 광섬유로 pigtail되어 있고, 필터 내부에 온도 안정화가 되어 있지 않은 소자이다. PWBG 파장 필터의 제작 과정은 여러 참고문헌에 발표되었다^[17-19]. 실험에서 사용한 PWBG의 코어와 클래딩 사이의 굴절률 변화는 전 가변 범위에 대해 1.5 % 정도로 설계되었다. PWBG의 굴절률은 1.38이며, 열-광학 계수는 $-2.567 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ 이다. 폴리머 도파로에서 격자의 깊이와 길이는 각각 400 nm와 4 mm이다. Figure 1은 넓은 밴드의 스펙트럼을 갖는 SOA를 이용하여 PWBG 파장 필터의 반사 특성을 측정하기 위한 실험 장치도를 보여준다. SOA로부터 출력된 빛은 광 서큘레이터를 통해서 PWBG 파장 필터로 입사하고, 브래그 조건에 맞는 파장은 다시 PWBG 파장 필터에서 반사되어 광 서큘레이터를 통해 광 스펙트럼 분석기(Optical spectrum analyzer: OSA)로 신호를 측정한다.

일반적으로 PWBG 파장 필터에서 반사되는 브래그 반사 파장 λ_B 는 식 (1)과 같이 주어진다.

$$\lambda_B = 2 \frac{\Lambda}{m} n_{eff} \quad (1)$$

여기서 Λ 는 폴리머 브래그 격자의 주기를 나타내고, m 은 브래그 격자의 차수, n_{eff} 는 PWBG의 유효 굴절률을 나타낸다. 따라서 폴리머 도파로에서 굴절률 변화에 대한 파장 변화는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta\lambda_B = 2 \frac{\Lambda}{m} \Delta n_{eff} \quad (2)$$

또한, 폴리머 도파로의 굴절률이 온도의 함수이기 때문에 $\Delta n = \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T$ 의 관계를 대입하면 온도변화에 대한 파장 변화를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\lambda_B = 2 \frac{\Lambda}{m} \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T \quad (3)$$

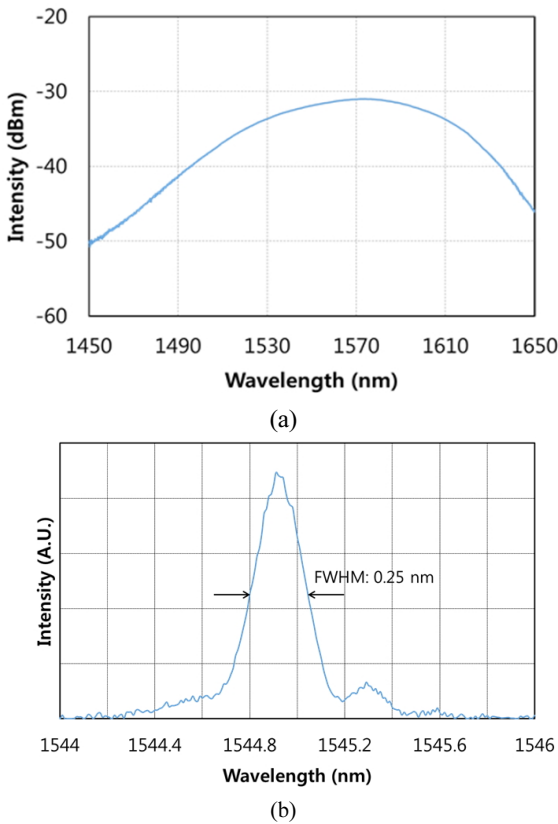


FIG. 2. Optical spectra of the (a) ASE from the SOA (injection current: 600 mA) and (b) reflected wavelength from the PWBG filter.

여기서, n 과 T 는 PWBG 파장 필터의 굴절률과 온도이고, 브라그 격자의 차수 m 은 1차이다. 실험에 사용한 SOA의 ASE (Amplified Spontaneous Emission) 출력은 Fig. 2(a)에서 보듯이 SOA에 600 mA의 인가 전류를 가해 주었을 때 1550 nm 영역에서 최대 피크에 대해 10 dB 밴드 폭이 약 145 nm 정도의 값을 갖는다. SOA의 넓은 파장의 빛이 PWBG 필터에 입사할 경우 브라그 조건에 맞는 특정한 파장만이 반사되고, 나머지는 투과하게 된다. Fig. 2(b)는 PWBG 필터에서 반사된 빛의 파장을 나타내는 스펙트럼이다. PWBG 필터에 아무런 전기적인 신호를 가해주지 않았을 때, 반사된 중심 파장은 1544.91 nm 였고, 필터의 반치폭(Full width at half maximum: FWHM)은 약 0.25 nm였다. 또한 PWBG 필터에 입사된 빛에 대한 반사된 빛의 세기의 비율인 반사율은 1545 nm에서 약 10%로 측정되었다. PWBG 필터에 전력 (electric power)을 가하면 폴리머 격자의 온도가 변화고 이로부터 식 (3)에 의해 반사되는 파장을 가변 할 수 있다.

2.2. 단일 파장 가변 레이저 출력 특성

PWBG 파장 필터에 전력을 가하면 반사 파장을 가변시킬 수 있고, 이를 광섬유 레이저 공진기 안에 삽입하면 파장 가변 레이저를 구현할 수 있다. Figure 3은 PWBG 파장 필터를 이용한 단일 파장 가변 광섬유 레이저를 구현하기 위한 실험

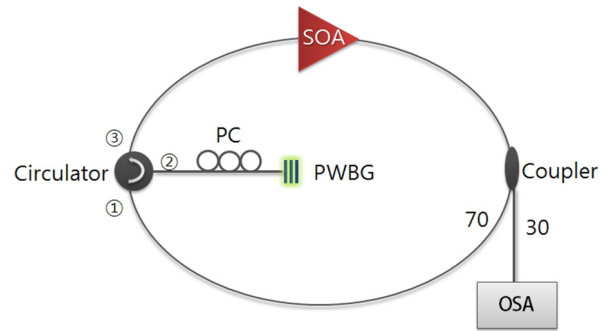


FIG. 3. Experimental setup of the wavelength tunable fiber laser based on PWBG wavelength filter.

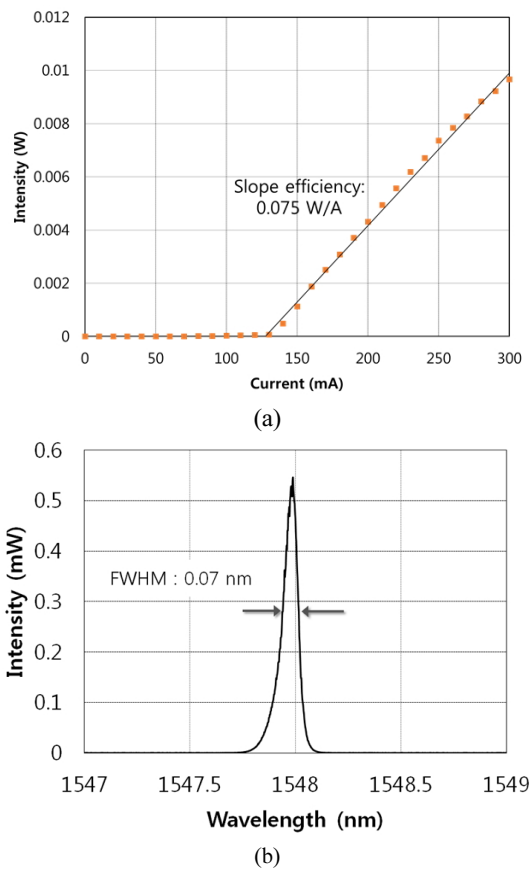


FIG. 4. (a) L-I Curve and (b) FWHM of the wavelength tunable fiber laser.

장치도이다. 레이저의 공진기는 기본적인 링 형태를 이루고 있으며, 레이저의 이득 매질로써 중심 파장이 1550 nm인 SOA를 사용하였다. 광섬유 커플러를 통하여 30%를 레이저의 출력으로 사용하였으며, 광 스펙트럼 분석기를 통하여 빛의 파장을 측정하였고, 70%의 빛은 레이저 공진기 내부로 되먹임 시켰다. 광 서큘레이터를 통하여 PWBG 파장 필터에서 반사된 특정한 파장만이 공진기 내부를 순회하여 레이저로 발전한다. 또한 실험에서 사용한 SOA와 PWBG 파장 필터가 편광 의존성이 있기 때문에 공진기의 편광을 조절해 주

기 위하여 편광 조절기를 삽입하였다.

PWBG 파장 필터에 전력을 인가해 주지 않은 상태에서 SOA에 인가해주는 전류를 증가시켜가면서 레이저의 L-I Curve를 측정하였으며, 그 값을 Fig. 4(a)에서 보여준다. 단일 파장 레이저의 slope efficiency는 0.075 W/A였으며, 임계전류는 약 130 mA였다. Figure 4(b)는 PWBG 파장 필터에 10 mW의 전력을 가하고, SOA에 600 mA의 전류를 인가해 주었을 때, 레이저의 반치폭은 중심파장이 1547.98 nm에서 약 0.07 nm로 측정되었다. 단순히 ASE 신호만을 갖는 SOA를 이용하여 PWBG 파장 필터에서 반사된 빛의 반치폭이 0.25 nm인 것과 비교하면, PWBG 파장 필터를 레이저 발진에 이용하였을 때 레이저로 발진된 빛의 반치폭은 PWBG 파장 필터의 값과 비교하였을 때 약 72% 좁아진 것을 볼 수 있다.

레이저의 파장을 가변시키는 방법은 PWBG 파장 필터의 열 전극(heating electrode)에 전력을 가해주어 구현할 수 있다. PWBG 파장 필터에 전력을 가해주면 폴리머의 온도가 올라가고, 식(3)에서 보듯이 폴리머는 온도변화에 따른 굴절률의 변화가 생기므로써 PWBG 파장 필터에서 반사하는 빛의 파장을 가변시킬 수 있다. 마찬가지로, PWBG 파장 필터는 외부에서 전력을 가해주지 않아도 외부 온도가 변하면 PWBG 파장 필터의 브래그 조건이 변하고, 이로부터 반사하는 빛의 파장도 변하게 된다. 이를 방지하기 위해서는 PWBG 파장 필터에 온도 조절을 통해 외부 온도에 따른 변화가 없도록 해 줘야 안정적으로 파장을 가변시킬 수 있다. 본 연구에서 사용한 PWBG 파장 필터는 온도 안정화가 없는 소자라서 외부 온도 변화에 얼마만큼 변화하는 지 측정해 보았다.

Figure 5는 레이저 공진기 내부의 편광을 조절하지 않고, PWBG 파장 필터에 전력을 인가하지 않은 상태에서 실내의 온도 변화에 대한 레이저의 발진 파장의 변화를 측정한 결과이다. 실험실 내부의 온도변화에 대하여 PWBG 파장 필터에 의한 레이저의 파장 변화는 10시간동안 측정하였다. 그림에서 보듯이 실험실의 온도변화에 대해서 측정한 레이저의 발진 파장이 변하는 것을 볼 수 있다. 측정을 시작한 초기부터 약 150분까지는 실내의 온도가 약 23.6°C부터 22.1°C까지 변

화하였으며, 이 때 레이저의 발진 파장은 1547.46 nm에서부터 1547.72 nm까지 장파장 쪽으로 이동하는 것을 확인할 수 있었다. 초기 온도가 하강할 때의 온도 변화에 대한 파장 변화율은 약 +0.17 nm/°C였다. 반대로 22.1°C에서 25.4°C까지 상승할 때의 파장 변화는 1547.72 nm에서 1546.68 nm로 단파장 쪽으로 이동함을 볼 수 있다. 온도가 상승할 때의 온도 변화에 대한 파장 변화율은 -0.33 nm/°C였다. 그 뒤 다시 온도가 하강할 때의 온도 변화에 대한 파장 변화율은 0.33 nm/°C로 거의 동일함을 볼 수 있다. 이는 초기에 PWBG 파장 필터의 온도변화가 열에 대해 늦은 반응에 따른 것으로 볼 수 있다. PWBG 파장 필터에 전력을 가해 줘 폴리머 격자의 온도를 변화시켜 주었을 때와 마찬가지로 실내의 온도가 올라감에 따라서 발진되는 파장은 단파장 쪽으로 이동하였고, 실내의 온도가 내려감에 따라서 발진되는 파장이 장파장 쪽으로 이동하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 PWBG 파장 필터의 온도가 올라가면 열-광학 효과에 의해서 폴리머의 유효 굴절률이 작아져 반사되는 파장이 단파장으로 변하고, PWBG 파장 필터의 온도가 내려가면 폴리머의 유효 굴절률이 커져 반사되는 파장이 장파장으로 변하게 되는 것으로 볼 수 있다. 따라서 PWBG 파장 필터는 외부의 온도 변화에 대해 민감하게 반응하는 것을 알 수 있었으며, PWBG 파장 필터를 이용하여 구성한 레이저의 발진 파장이 외부 온도에 따라서 변하지 않도록 하기 위해서는 PWBG 파장 필터에 TEC (Thermoelectric Cooling) Module을 연결하여 필터의 온도를 일정하게 유지해 주어야 한다.

레이저에서 발진하는 파장은 레이저 공진기 안의 편광 상태에 따라서도 변하게 된다. Figure 6은 PWBG 파장 필터에 전력을 인가하지 않은 상태에서 레이저 공진기 내부의 편광 조절기를 사용하여 PWBG 파장 필터에 입사하는 편광을 바꾸어 주었을 때 레이저에서 발진하는 파장의 변화를 보여준다. 본 연구에서는 레이저 공진기가 모두 광섬유로 피그테일(pigtailed fiber) 되어 있어서 필터에 입사하는 빛의 편광을

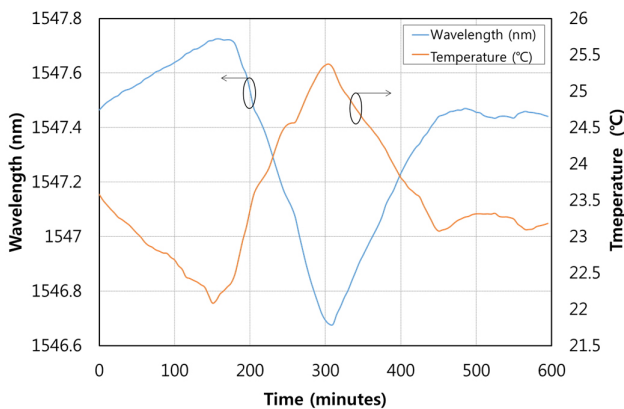


FIG. 5. Wavelength variation against environmental temperature variation.

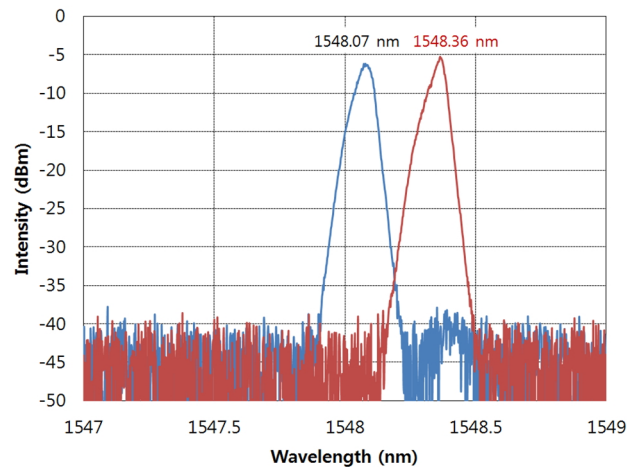


FIG. 6. Wavelength variation according to the polarization states in the laser cavity.

정확하게 알 수 없다. 다만 레이저 공진기 안의 편광 조절기를 적당히 조절하면 발진되는 파장의 변화를 관측할 수 있으며, 본 연구에서도 레이저 공진기 내부의 편광 조절을 통해 최대파장과 최소파장을 측정하여 편광 상태에 따른 변화량을 조사하였다. 그림에서 보듯이 PWBG 파장 필터에 입사하는 편광상태에 따라서 레이저에서 발진하는 파장은 최소 1548.07 nm에서 1548.36 nm까지 약 0.29 nm를 이동하는 것을 볼 수 있다. 따라서 레이저 공진기 안의 빛의 편광에 따라 PWBG 파장 필터에 의해 발진 파장이 약간 변하는 것을 알 수 있었다.

PWBG 파장 필터를 이용한 단일 파장 가변 레이저는 필터에 인가하는 전력을 증가하거나 감소함으로써 구현한다. 본 연구에서는 PWBG 파장 필터의 열 전극에 전력 공급기(power supply)를 연결하고 전력(electric power)을 인가해 주어 레이저의 파장을 가변하였다. 인가해주는 전력을 연속적으로 증가시켜주면 발진하는 빛의 파장도 연속적으로 변하게 된다. 공진기 내부의 편광을 조절해 주지 않았을 때 PWBG 파장 필터에 인가하는 전력을 변화시켜 가면서 레이저에서 발진하는 빛의 파장을 1528 nm에서 1547 nm까지 1 nm 간격으로 각각의 파장에서 빛의 세기 및 반치폭을 측정하였으며 이를 Fig. 7에서 보여준다. 공진기 내부의 편광을 조절해 주지 않으면 레이저 빛의 파장을 가변시킬 때 각 파장에서 발진하는 레이저의 세기는 일정하지 않았으며, 반치폭 또한 일정하지 않음을 확인할 수 있었다. 이는 사용한 SOA가 편광 의존성이 있으며, PWBG 파장 필터의 편광 의존성에 의해서 나타나는 현상으로 볼 수 있다. 따라서 레이저의 출력이 일정하게 유지하고 반치폭도 어느 범위 안에서 값을 갖기 위해서는 공진기 내부의 편광을 일정하게 유지시켜줄 수 있는 편광 유지 광섬유로 레이저 공진기를 구성해야 한다.

Figure 8은 PWBG 파장 필터에 인가하는 전력을 0 mW에서 100 mW까지 5 mW씩 증가 시켜 주었을 때 레이저의 발진 파장이 1548.24 nm에서 1531.95 nm까지 가변되는 광 스펙트럼을 나타낸 것으로, 레이저 공진기 안의 편광 조절기를 적절히 조절하여 진폭이 0.2 dB 미만으로 일정하게 유지되

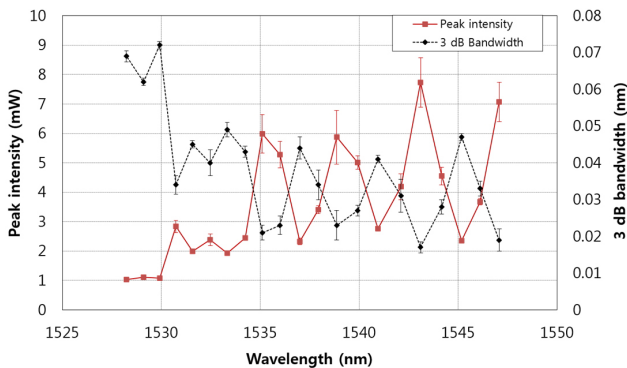


FIG. 7. The peak intensity variation and its 3 dB bandwidth at each wavelength.

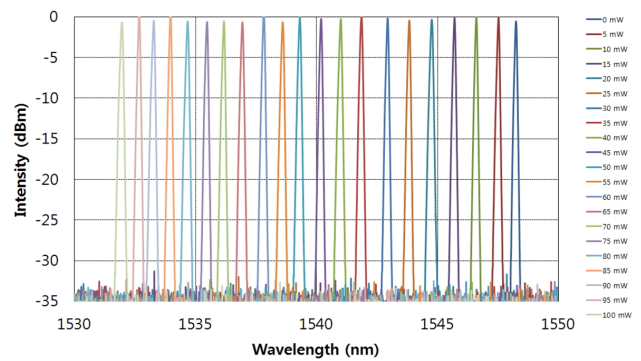


FIG. 8. Optical spectra for the wavelength tunable fiber laser.

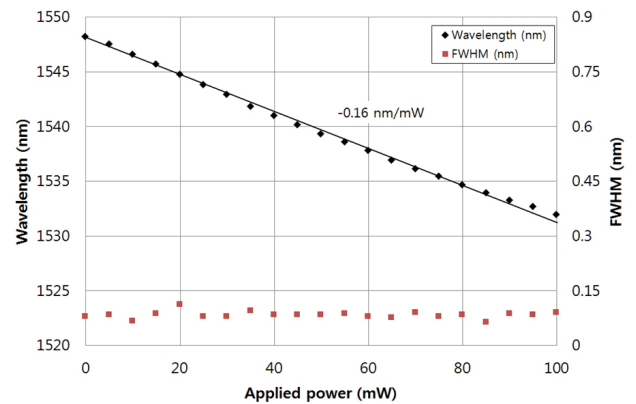


FIG. 9. 3 dB bandwidth of the lasing spectra and tuning of the lasing wavelength with the applied electrical power to the PWBG wavelength filter.

도록 하였다. 그림에서 측정된 선폭이 넓게 보이는 이유는 측정 범위가 1530 nm에서 1550 nm로 OSA에서 측정 분해능 선폭(resolution bandwidth)을 0.5 nm로 하였기 때문이다. 레이저에서 발진하는 파장에 따라서 최적의 편광을 편광 조절기를 통해서 조절해 줄 경우, 각 파장에서 발진하는 레이저의 출력을 조절할 수 있었으며 이 때 side mode suppression ratio (SMSR)는 모든 파장 가변 범위에서 35 dB 이상으로 얻어낼 수 있었다.

Figure 9는 레이저 공진기 안의 편광 조절기를 적절히 조절하여 가변하는 모든 파장에 대해 진폭이 일정하도록 유지시키고, 이 때 측정된 파장 가변된 레이저의 파장 가변 범위와 각각 파장에서의 반치 폭의 값을 보여준다. PWBG 파장 필터에 인가해주는 전력에 따라 레이저에서 발진하는 중심 파장은 Fig. 8과 동일하며, 그 반치폭은 0.06 nm에서 0.09 nm의 값을 갖는 것을 볼 수 있다. Figure 7의 결과와 비교해보면 레이저 공진기 안의 편광 조절기를 적절히 조절하면 발진하는 빛의 진폭을 최적화시킬 수 있음을 볼 수 있다. 파장 가변 레이저는 PWBG 파장 필터에 가해주는 전력을 선형적으로 증가시켰을 때 파장 가변 또한 선형적으로 변하였으며, 이 때 구한 slope efficiency는 약 -0.16 nm/mW였다.

III. 결 론

본 논문에서는 폴리머 광 도파로 기반의 브라그 격자 (PWBG) 파장 필터를 광섬유 레이저 공진기 내부에 삽입하여 단일 파장 가변 레이저를 구현하였고, 주위 온도 및 공진기 내부의 편광상태에 따른 출력특성에 대하여 연구한 결과를 보고하였다. 레이저에서 발진하는 파장의 가변은 PWBG 파장 필터에 인가한 전력을 변화시킴으로써 구현할 수 있다. PWBG 파장 필터에 0 mW에서 100 mW의 전력을 인가해 주었을 때 레이저에서 발진하는 파장은 1548.24 nm에서 1531.95 nm까지 약 16.29 nm를 가변할 수 있었으며, 이 때 slope efficiency는 약 -0.16 nm/mW였다. 또한 레이저 공진기 안의 편광을 적절하게 조절하여 모든 파장 가변 범위에서 0 dBm에 가까운 광 출력을 얻었으며, 35 dB 이상의 SMSR (side mode suppression ratio)을 얻을 수 있었다. PWBG 파장 필터에서 반사되는 파장은 외부 온도 변화에 대하여 민감한 반응을 보이는 것을 확인하였다. 따라서 PWBG 필터를 이용한 레이저의 발진 파장이 외부 온도에 영향을 받지 않도록 하기 위해서는 TEC Module을 연결하여 필터의 온도를 일정하게 유지해 주어야 한다. 또한 레이저에서 발진하는 파장은 PWBG 파장 필터에 입사하는 편광에 따라서 약 0.29 nm의 차이를 보였으며, 공진기 내부의 편광을 조절함으로써 발진하는 레이저의 출력을 최적화시킬 수 있음을 보였다. 결론적으로 PWBG 파장 필터를 이용하여 안정된 파장 가변 레이저의 구현은 필터의 온도 안정화와 레이저 공진기를 편광유지 광섬유로 제작하면 구현할 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 충남대학교 재직교원 학술연구비(2014년) 지원으로 수행된 연구결과이다.

References

1. N. Bamiedakis, J. Beals IV, R. V. Penty, I. H. White, J. V. DeGroot, Jr., and T. V. Clapp, "Cost-effective multimode polymer waveguides for high-speed on-board optical interconnects", *IEEE J. Quant. Electron.* **45**, 415 (2009).
2. J.-W. Kim, N.-S. Son, J.-H. Jang, K.-J. Kim, and M.-C. Oh, "Ultra-low inter-channel crosstalk in array waveguide device incorporating self-assembled microsphere diffraction layer," *Opt. Express* **19**, 20904-20909 (2011).
3. H. Uno and T. Ishigure, "GI-core polymer parallel optical waveguide with high-loss, carbon-black-doped cladding for extra low inter-channel crosstalk," *Opt. Express* **19**, 10931-10939 (2011).
4. S.-H. Park, J.-W. Kim, M.-C. Oh, Y.-O. Noh, and H.-J. Lee, "Polymer waveguide birefringence modulators," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **24**, 845-847 (2012).
5. J.-W. Kim, S.-H. Park, W.-S. Chu, and M.-C. Oh, "Integrated-optic polarization controllers incorporating polymer

6. J.-S. Shin, C.-H. Lee, S.-Y. Shin, G.-H. Huang, W.-S. Chu, M.-C. Oh, Y.-O. Noh, and H.-J. Lee, "Arrayed waveguide collimators for integrating free-space optics on polymeric waveguide devices," *Opt. Express* **22**, 23801-23806 (2014).
7. J.-S. Shin, T.-H. Park, W.-S. Chu, C.-H. Lee, S.-Y. Shin, and M.-C. Oh, "Tunable channel-drop filters consisting of polymeric Bragg reflectors and a mode sorting asymmetric X-junction," *Opt. Express* **23**, 17223-17228 (2015).
8. K. O. Hill and G. Meltz, "Fiber Bragg Grating Technology Fundamental and Overview," *J. Lightwave Technol.* **15**, 1263-1276 (1997).
9. Ahmad, H.; Saat, N.K.; Harun, S.W. S-band erbium-doped fiber ring laser using a fiber Bragg grating. *Laser. Phys. Lett.* **2005**, *2*, 369-371.
10. S. Feng, O. Xu, S. Lu, X. Mao, T. Ning, and S. Jian, "Single-polarization, switchable dual-wavelength erbium-doped fiber laser with two polarization-maintaining fiber Bragg gratings," *Opt. Express* **16**, 11830-11835 (2008).
11. M. Y. Jeon, N. Kim, J. Shin, J. S. Jeong, S.-P. Han, C. W. Lee, Y. A. Leem, D.-S. Yee, H. S. Chun, and K. H. Park, "Widely tunable dual-wavelength Er³⁺-doped fiber laser for tunable continuous-wave terahertz radiation," *Opt. Express* **18**, 12291-12297 (2010).
12. Y.-O. Noh, H.-J. Lee, J. J. Ju, M.-s. Kim, S. H. Oh, and M.-C. Oh, "Continuously tunable compact lasers based on thermo-optic polymer waveguides with Bragg gratings," *Opt. Express* **16**, 18194-18201 (2008).
13. 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).
14. 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).
15. B. K. Choi, I.-G. Park, J. H. Byun, N. Kim, S.-P. Han, K. H. Park, J. K. Seo, H. K. Lee, and M. Y. Jeon, "A widely tunable, dual-wavelength fiber laser incorporating two polymer waveguide Bragg gratings," *Laser Phys. Lett.* **10**, 125105 (2013).
16. C.-H. Sung, J.-W. Kim, J.-S. Shin, and M.-C. Oh, "Two-Wavelength Lasers Based on Oversized Rib Polymer Waveguide Bragg Reflectors," *Korean Journal of Optics and Photonics*, Vol. **25**, p. 38 (2014).
17. K.-J. Kim, J.-K. Seo, and M.-C. Oh, "Strain induced tunable wavelength filters based on flexible polymer waveguide Bragg reflector," *Opt. Express* **16**, 1423-1430 (2008).
18. K.-J. Kim and M.-C. Oh, "Flexible Bragg reflection waveguide devices fabricated by post-lift-off process," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **20**, 288-290 (2008).
19. S. H. Oh, K.-H. Yoon, K. S. Kim, J. 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. Sel. Top. Quantum. Electron.* **17**, 1534-1541 (2011).