부 모드 억제율이 향상된 소형 이중 링 공진 반사기 기반 하이브리드 집적 파장 가변 레이저

권오상 · 정영철[†]

광운대학교 전자통신공학과

Ⓢ 139-701 서울특별시 노원구 월계동 447-1

(2011년 1월 14일 받음, 2011년 2월 28일 수정본 받음, 2011년 2월 28일 게재 확정)

본 논문에서는 폴리머 도파로를 이용하여 소형 이중 링 공진 반사기를 설계하고 제작하여 그 측정 결과를 분석하였다. 소형 이중 링 공진 반사기는 반경이 서로 다른 두 개의 링 공진기 구조에 의한 베니어 효과로 인해 넓은 범위의 파장가변 특성을 확인 할 수 있었다. 소형 이중 링 반사기의 삽입 손실을 줄이기 위해 도파로의 길이를 기존에 보고된 소자에 비하여 크게 줄임으로써 부 모드 억제율이 크게 향상됨을 확인 하였다. 측정결과 소형 이중 링 공진 반사기 기반 하이브리드 집적 레이저는 45 dB의 부모드 억제율을 유지하면서 단일 모드로 발진함을 확인하였다. 또한 소형 이중 링 공진 반사기 상부에 형성된 전극에 최대 30 mA의 튜닝전류를 인가하여 약 40 nm 까지의 파장가변을 확인하였다.

Hybrid-Integrated Tunable Laser Based on Small Double-Ring Resonator with Improved Side Mode Suppression Ratio

Oh-Sang Kwon and Youngchul Chung[†]

Department of Electronics and Communications Engineering, Kwangwoon University,

447-1 Wolgye-dong, Nowon-gu, Seoul 139-701, Korea

(Received January 14, 2011; Revised manuscript February 28, 2011; Accepted February 28, 2011)

In this paper, a small double ring resonator reflector was designed and fabricated using a polymer waveguide, and the measurement result was discussed. A widely tunable characteristic of the small double ring resonator caused by the Vernier effect, which results from the difference of the ring radii, was observed. The insertion loss of the double ring reflector was reduced by minimizing the device length to be as short as possible, and thus the output power and the SMSR (side mode suppression ratio) was greatly enhanced. The hybrid integrated laser based on the small double ring resonator reflector lased with the SMSR of 45 dB. In addition, the wide tuning range of 40 nm could be obtained by injecting a current of 30 mA to an electrode on top of the reflector.

Keywords: Tunable lasers, Polymer waveguides, Ring resonators, Hybrid integration

OCIS codes: (140.3600) Lasers, tunable; (160.5470) Polymers; (230.3120) Integrated optics devices; (230.7390) Waveguides, planar

I. 서 론

각 가입자에게 제공되는 대역폭에 거의 제한이 없고 고속 전송이 가능한 차세대 가입자 망으로 WDM-PON(Wavelength Division Multiplexing-Passive Optical Network)이 최근 주목 받고 있다. WDM-PON을 경제적으로 구현하기 위해서는 단일파장 광원의 부품 비용을 낮추는 것이 관건으로, 이를 해

결하기 위한 노력이 집중되고 있다.^[1-2] 차세대 가입자 망의 궁극적인 솔루션인 WDM-PON을 경제적으로 구현하기 위해 단일 파장 광원의 부품의 비용을 낮추는 방법들 중의 하나로서, 능동 소자인 R-SOA(Reflective semiconductor optical amplifier)와 수동 소자인 평판 도파로 기반의 파장 선택 반사기를 집적함으로써 상대적으로 저가에 제작이 가능한 하이브리드 집적 파장가변 레이저들이 제안 및 구현된 바 있다.^[3-5]

[†]E-mail: ychung@kw.ac.kr

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

본 논문에서는 하이브리드 집적 레이저의 파장 선택 반사기로서 동작하는 소형 이중 링 공진 반사기의 길이를 최소화하고 작은 크기와 우수한 광 신호 처리, 그리고 고밀도 집적이 가능한 마이크로 링 공진기를 기반으로 제작되었다. 마이크로 링 공진기는 링의 반경에 따라 FSR(Free Spectral Range)이 달라진다. 파장 선택 반사기인 소형 이중 링 공진 반사기의 두 링 공진기는 각각 반경이 다르게 설계되어 버니어 효과에 의해 두 링의 공진 조건을 동시에 만족하는 파장에서 강한 반사가 일어나게 되고 그 파장을 중심으로 점차 약하게 반사된 파장들이 주기적으로 나타나게 된다.^[8] 따라서 R-SOA에서 생성된 빛이 반사기를 통해 특정파장에서 가장 강한 반사가 일어나고 이때의 광파가 R-SOA로 재입사되는 과정이 반복됨으로써 단일모드로 발진하게 된다. 이 때 파장 선택 반사기는 열광학 특성이 우수한 폴리머 물질을 이용하여 제작하였고, 전류 주입으로 발생하는 전극의 열을 이용해 링 공진기 주변의 굴절률을 조절하여 각 링 공진기의 FSR 및 공진파장을 변화시켜 광대역 파장가변이 가능하도록 하였다.^[6-7]

본 논문 II장에서는 제안된 소형 이중 링 공진 반사기 기반 하이브리드 집적 레이저의 구조 및 동작원리에 대하여 간략하게 설명하였고, III장에서는 파장 선택 소자인 소형 이중 링 공진 반사기의 설계에 대하여 설명하였으며, IV장에서는 제작된 소형 이중 링 공진 반사기 기반 하이브리드 집적 레이저를 측정하여 얻은 결과들을 분석하여 정리하였다.

II. 소형 이중 링 공진 반사기 기반 하이브리드 집적 레이저의 구조 및 동작 원리

하이브리드 집적에 사용되는 R-SOA는 그림 1(a)와 같이 단면 반사에서 발생하는 반사를 최소화 하기위해 약 7°의 기울어져 있는데 스넬의 법칙(Snell's law)을 고려하여 광파가 최대한 입사되도록 반사기의 입출력 도파로 기울기는 그림 1(b)에 보인 바와 같이 약 13° 기울어지게 설계 되었다.

소형 이중 링 반사기의 구조는 그림 1(a)과 같이 두 개의 링 공진기(R_0 , R_1)와 두 개의 버스 도파로(Bus_1 , Bus_2), 그리고 한쪽 버스 도파로에 집적된 루프 백 미러로 구성되어 있다.^[11] 링 공진기의 출력은 버스 도파로(Bus_1)와 첫 번째 링 공진기(R_0) 사이의 결합비율(κ_0), 첫 번째 링 공진기(R_0)와 두 번째 링 공진기(R_1) 사이의 결합비율(κ_1) 그리고 두 번째 링 공진기(R_1)와 버스 도파로(Bus_2) 사이의 결합비율(κ_2)에 의해 결정된다. 링 공진기는 대칭 구조로 설계되었기 때문에 κ_0 와 κ_2 는 같다.

동작원리는 다음과 같다. 버스 도파로(Bus_1)를 통하여 R-SOA에서 입사된 광파는 버스 도파로(Bus_1)와 첫 번째 링 공진기(R_0) 사이에서 광 결합이 이루어져 시계방향으로 공진하게 된다. 공진된 광파는 링 공진기(R_0)를 진행하다가 두 번째 링 공진기(R_1)와 결합하여 반시계 방향으로 공진하게 된다. 이 광파는 두 번째 링(R_1)을 진행하게 되고 광파는 버스 도파로

(Bus_2)와 결합을 이루게 된다. 버스 도파로(Bus_2)를 진행하던 광파는 3 dB 결합기로 구성된 Loop-back mirror를 거쳐서 100% 반사가 일어나게 된다. 반사된 광파는 앞의 진행 과정을 반복해 입력방향으로 진행하고, 이 광파는 결국 반사파로 나타나게 된다. 이와 같은 과정을 반복하여 광파는 특정파장에서만 발진하게 되는데, 이 때 특정파장에서만 발진하게 되는 이유는 두 링 공진기(R_0 , R_1)의 반경이 약간 다르기 때문에 발생하는 버니어 효과에 따른 것이다. 첫 번째 링 공진기(R_0)의 반경이 156 μm 이고 또 다른 링 공진기(R_1)의 반경은 150 μm 로 정하였다. 각 링 공진기의 공진조건을 만족하는 파장들은 서로 다른 FSR을 나타내고, 두 공진 조건을 동시에 만족하는 파장에서만 크게 공진이 발생하게 되는데, 이를 버니어 효과라고 하고 이를 그림 2에 나타내었다. 이와 같은 버니어 효과에 의해 광대역 파장가변이 일어나게 되고,^[8] 확장된 파장가변 범위는 식 (1)과 같이 주어진다.

FIG. 1. (a) Schematic configuration of hybrid-integrated tunable laser and (b) design of tilted input waveguide.

FIG. 2. Resonance condition of coupled rings with different radii.

FIG. 3. Fabrication process of double ring resonator reflector.

$$\Delta\lambda_{tune} = \frac{\lambda_0^2}{2\pi n_g (R_1 - R_0)} \quad (1)$$

III. 소형 이중 링 공진 반사기 설계

본 논문에서 제작한 소형 이중 링 공진 반사기는 그림 3에 나타난 공정에 따라 제작되었다. 코어와 클래딩은 저손실 폴리머 물질을 사용하였고, 실리콘 웨이퍼 위에 클래딩 폴리머를 스핀코팅하여 도포하였으며, 포토 리소그래피 공정을 통하여 패턴을 형성한 후 코어의 높이만큼 클래딩을 건식 식각하였다. 이렇게 형성된 코어 영역에 코어에 해당하는 폴리머를 스핀코팅 공정으로 채운 후, 코어의 높이를 적절하게 맞추기 위해 다시 건식 식각하였다. 그 후 클래딩 폴리머를 이용하여 상부 클래딩을 형성 하였다. 각 도파로 제작 공정에서 사용되어진 폴리머는 자외선 및 열 경화 방법을 통하여 경화 하였다. 또한 소형 이중 링 공진기의 굴절률 변화를 주기위해 전극을 증착시켰다.^[9]

소형 이중 링 반사기의 도파로 구조는 그림 4와 같은 매립형 구조로서 코어는 폭 $1.5 \mu\text{m}$ 와 높이 $1.6 \mu\text{m}$ 의 직사각형으로 구성되어 있고, 클래딩이 코어를 감싸는 구조이다. 이때 코어와 클래딩의 굴절률은 각 1.51과 1.378로 8.7%의 높은 굴절률 차를 갖는 도파로로 설계되었으며 시뮬레이션 결과 광을 효과적으로 구속시킬 수 있음을 확인할 수 있었다. 높은 굴절률 차는 굽음 손실(bending loss)을 최소화하여 링의 반경을 상당히 줄일 수 있기 때문에 작은 크기의 소자를 구

FIG. 4. Cross-sectional configuration of buried polymer waveguide.

현할 수 있다.

그림 5는 링의 반경에 따른 굽음 손실을 보여주고 있다. 그림 5에서 반경이 $120 \mu\text{m}$ 이상일 때 굽음 손실이 0.005 dB/cm 이하가 됨을 볼 수 있다. 따라서 설계된 소자에서 굽음 손실은 무시 될 정도로 작음을 알 수 있다. 반사기인 루프 백 미러는 다음 그림 6(a)와 같이 방향성 결합기와 링 도파로로 구성되어 있는데, 그림 6(b)는 결합비율에 따른 반사 파워를 보여주고 있다. 그림 6(b)에서 보는바와 같이 결합기에서의 광 파워 결합 비율이 0.5 일 때 100% 파워 반사가 나타나지만, 파워 결합 비율이 0.3 정도로 저하되었다고 80% 정도의 파워 반사는 얻을 수 있음을 알 수 있다.^[9]

본 논문에서는 기존에 제작된 소형 이중 링 반사기의^[9] 손실을 줄이기 위한 방안으로 도파 길이를 최대한 줄여서 설계

FIG. 5. Bending loss as a function of ring radius.

FIG. 6. (a) Configuration of loop-back mirror and (b) power reflection as a function of power coupling ratio.

하였다. 설계된 소형 이중 링 반사기의 버스 도파로(Busi) 길이를 15,000 μm 에서 7500 μm 로 줄임으로서 약 1 dB 이상 손실이 줄어들게 되어 향상된 SMSR (Side Mode Suppression Ratio)을 기대할 수 있다.

IV. 하이브리드 집적 파장 가변 레이저의 측정 결과

소형 이중 링 반사기 기반 하이브리드 집적 레이저는 이중 링 공진기 반사기의 통과 포트(through port) 출력 도파로와 단일 모드 광섬유와의 정렬을 통하여 발진 특성을 측정하였다. R-SOA와 이중 링 반사기에 TEC(Thermo Electric Cooling)

(a)

(b)

FIG. 7. (a) Reflection and through characteristics and (b) its enlarged view around 1541 nm.

를 장착하여 온도가 일정하도록 유지하였다. 이는 온도가 일정하지 않으면 주입 전류의 증가에 따라 활성층의 온도가 증가하게 되고 그에 따라 발진 중심 파장의 변화가 발생하게 되어 집적 후에 레이저 동작 시 반사기의 반사 파장과 파장 불일치를 발생하게 되기 때문에 R-SOA와 이중 링 반사기 모두 20°C의 온도로 유지하였다.

그림 7은 반사기의 반사 및 통과 특성 측정 결과를 나타낸 것으로 41 nm의 파장가변 범위와 1.4 nm의 FSR을 갖는 것을 확인 하였다. 측정된 파장 가변 범위는 식 (1)의 계산 결과와, FSR은 식 (2)를 통해 계산되는 값과 거의 같음을 알 수 있었다.

$$FSR = \frac{\lambda_0^2}{n_g L_{ring}} \quad (2)$$

식 (2)에서 λ_0 는 중심 파장, n_g 는 공진기의 군 굴절률, L_{ring} 은 링 공진기의 주회길이를 나타낸다.

그림 8은 소형 이중 링 공진 반사기 기반 하이브리드 집적 레이저의 L-I Curve 측정 결과이다. 그림과 같이 100 mA까

FIG. 8. Measured L-I Curve of the hybrid-integrated tunable laser.

FIG. 9. (a) Lasing spectrum for the injection current of 50 mA and (b) wavelength-tuning characteristics of the hybrid-integrated tunable laser.

지 전류를 인가하였을 경우 레이저의 파워는 약 0.8 mW로 측정되었다. 그림 9(a)는 R-SOA에 50 mA의 전류를 인가했을 때의 하이브리드 집적 레이저의 발진 스펙트럼을 나타내고 1571 nm에서 단일 모드로 발진한다. 이때 R-SOA와 소자

FIG. 10. Tuning curve as a function of applied tuning current.

의 온도는 20℃로 고정하였다. 파장가변 특성을 측정하기 위해 우선 R-SOA에 주입되는 전류를 50 mA로 일정하게 유지하였고, 이중 링 공진 반사기의 한쪽 링 공진기 상부에 형성된 전극으로 전류를 인가하여 공진기의 굴절률을 조절하였다. 제안된 하이브리드 집적 레이저의 파장가변 특성을 측정하기 위해 전극에 최대 30 mA의 전류를 인가시키며 측정한 결과 파장 가변 범위 안에 총 30개의 발진모드를 확인하였다. 이때의 부모드 억제율은 45 dB였고 선폭은 0.03 nm로 측정되었다. 그림 9(b)는 인가전류에 따른 발진 모드의 파장 이동성을 나타냈다. 전극에 주입되는 전류의 양을 증가시킬수록 발진 파장이 장파장 쪽으로 이동하였으며 최대 30 mA의 전류인가를 통하여 약 40 nm의 발진 파장의 이동을 확인하였다. 전류에 따른 파장 튜닝 곡선을 그림 10에 나타내었다. 인가전류를 증가시키기에 따라 링 공진기의 FSR과 일치하는 1.4 nm 감소할 때 마다 발진모드가 나타났다. 두 링 위의 전극에 인가되는 전류 및 TEC의 세 전류를 조절하면 모든 ITU grid에 부합하는 파장에서 발진하도록 할 수 있으며, 이를 Look-up table로 구성하여 원하는 파장으로 실시간 이동할 수 있을 것이다.

V. 결 론

본 논문에서는 부모드 억제율이 향상된 소형 이중 링 공진 반사기 기반 저가형 하이브리드 집적 파장가변 레이저를 구현하였고 그 특성을 제시하였다. 소자의 길이를 7500 μm 가 되도록 설계하여 이전 소자에 비하여 약 반으로 소형화하고, 이중 링 공진 반사기의 입력 단을 경사지게 함으로써, 단면에서의 반사가 반사형 반도체 광증폭기로 유입되는 것을 최소화하도록 하였다. 또한 코어와 클래딩의 굴절률 차이가 8.7% 정도로 매우 큰 폴리머 도파구조를 사용함으로써, 곡선 도파로의 반경을 100 μm 에 가까이 작게 설계할 수 있었다. 소형 이중 링 공진 반사기와 반사형 반도체 광증폭기를 하이브리드 집적하게 되면 광파는 이중 링 공진기와 루프 백 미러를 통하여 특정 파장 성분들만 반사형 반도체 광 증폭기로 피드백 되는데, 이때 가장 강한 반사가 발생하는 파장에만

이득이 집중되며 이런 과정의 반복을 통해 단일 모드 발진을 하게 된다. 이중 링 공진기의 두 링의 반경이 약간 상이하게 하여 버니어 효과가 발생하게 함으로써, 파장 가변 범위를 크게 확장하였다.

제작된 소형 이중 링 공진 반사기는 반사형 반도체 광 증폭기와 하이브리드 집적되었으며, 단일 모드로 발진하는 것을 측정을 통해 확인할 수 있었다. 약 40 nm의 파장가변 범위 안에서 총 30개의 발진모드를 확인하였고, 단일모드 광섬유에 결합되어 나오는 출력 파워는 100 mA의 주입 전류 인가 시 0.8 mW, SMSR은 45 dB 이상임이 측정되었다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2010-0008566)

References

1. C. Lee, W. Sorin, and B. Kim, "Fiber to the home using a PON infrastructure," *J. Lightwave Technol.* **24**, 4568-4583 (2006).
2. D. Shin, Y. Keh, J. Kwon, E. Lee, J. Lee, M. Park, J. Park, Y. Oh, S. Kim, I. Yun, H. Shin, D. Heo, J. Lee, H. Shin, H. Kim, S. Park, D. Jung, S. Hwang, Y. Oh, D. Jang, and C. Shim, "Low-cost WDM-PON with colorless bidirectional transceivers," *J. Lightwave Technol.* **24**, 158-165 (2006).
3. J. Park, T. Lee, D. Lee, S. Kim, and Y. Chung, "Hybrid-integrated tunable laser using polymer coupled-ring reflector," *Electron. Lett.* **44**, 1464-1466 (2008).
4. J. Park, T. Lee, and Y. Chung, "Hybrid-integrated tunable laser diode using polymer coupled-ring reflector," *Hankook Kwanghak Hoeji (Korean J. Opt. Photon.)* **19**, 219-223 (2008).
5. S. Kim, Y. Byun, D. Kim, N. Dagli, and Y. Chung, "Widely tunable coupled-ring reflector laser diode consisting of square ring resonators," *J. Opt. Soc. Korea* **14**, 38-41 (2010).
6. S. Kim and Y. Chung, "Design and analysis of a widely tunable sampled grating DFB laser diode with high output power," *J. Opt. Soc. Korea* **8**, 13-16 (2004).
7. J. Park, T. Lee, D. Lee, S. Kim, W. Hwang, and Y. Chung, "Widely tunable coupled-ring-reflector filter based on planar polymer waveguide," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **20**, 988-990 (2008).
8. G. Griffel, "Vernier effect in asymmetrical ring resonator array," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **12**, 1642-1644 (2000).
9. H. Lee, G. Kim, J. Park, S. Kim, and Y. Chung, "Widely tunable wavelength-selective reflector using polymer waveguide double-ring-resonator add/drop filter and loop-back mirror," *J. Opt. Soc. Korea* **12**, 157-161 (2008).