

폴리머 결합 링 반사기를 이용한 하이브리드 집적 파장 가변 레이저

박준오 · 이태형 · 정영철[†]

광운대학교 전자통신공학과
☎ 139-701 서울특별시 노원구 월계동 447-1

(2008년 5월 13일 받음, 2008년 6월 3일 수정본 받음, 2008년 6월 5일 게재 확정)

광대역 파장 가변 레이저를 구현하기 위하여, 폴리머 결합 링 반사기를 반사형 반도체 광증폭기와 하이브리드 집적하여 광대역 파장 가변 레이저를 구현하였다. 도파로 폭과 높이의 제작 오차로 인하여 방향성 결합기의 결합 비 조합이 설계 값에서 다소 벗어나더라도 단일 피크 조건이 유지되도록 설계함으로써, 제작 수율을 높이도록 하였다. 구현한 파장 가변 레이저는 파장 가변 범위가 35 nm, 부모드 억제 비가 30 dB 이상 보임을 확인하였다.

주제어: Polymer, Tunable filter, Hybrid-integrated laser, Ring resonator, Planar lightwave circuit

I. 서 론

현재 사용중인 시분할 방식의 E-PON(Ethernet PON)은 전송용량의 한계가 존재하기 때문에 미래의 기가 비트급의 가입자 망을 구성하기 위해서는 WDM-PON(Wavelength Division Multiplexing PON)을 E-PON과 혼용하여 사용하거나 WDM-PON만을 사용하여야 한다. WDM-PON의 구성을 할 경우에는 각 가입자에게 고유한 송신 파장을 제공하기 위하여 단일 파장 레이저 다이오드를 가입자용 광원으로 사용된다. 이러한 경우, 망을 구성하기 위한 비용이 많이 소요되며, 망을 유지하기 위한 백업 광원도 각 파장에 대하여 다량 구비해야 하기 때문에 유지 보수에 많은 어려움이 있다. WDM-PON의 광원을 저가형 파장가변 레이저 다이오드로 사용하게 된다면 망 구성 및 유지, 보수비용을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 망의 확장이 보다 용이해지며 파장자원을 보다 효율적으로 사용할 수 있다. 이러한 이유로 저가형 파장가변 광원에 대한 연구가 앞으로의 광대역 가입자망 전송시스템을 구성하기 위해서 매우 중요하다.^[1]

이러한 저가형 파장가변 광원을 제작하기 위해서, 본 논문에서는 SGDBR의 반사 스펙트럼과 유사한 특성을 가지는 마이크로 링 공진기 기반의 결합 링 반사기(CRR: Coupled Ring Reflector)를 제작하고, 이를 능동소자와 하이브리드 집적함으로써 광대역 파장가변 레이저를 구현하였다. 여기서 수백 nm 주기의 격자 구조 대신에 일반적인 포토리소그래피 공정으로 제작 가능한 평판 광 도파 회로(PLC: Planar Lightwave Circuit)형태의 결합 링 반사기를 파장 선택 소자로 활용하였다. 즉, 열 광학(Thermo-optic)특성이 우수한 저 손실 폴리머를 사용하여 광대역에 걸쳐 파장가변이 가능한 결합 링 반사기를 제작하였고, 반사형 반도체 광 증폭기(R-SOA: Reflective Semiconductor Optical Amplifier)를 하이브리드 집

적한 형태로 파장가변 레이저를 구현하였다. 반사형 반도체 광증폭기는 최근 WDM-PON용 광원으로 연구가 진행되고 있는 소자로,^[2] 비교적 저가에 공급될 가능성이 있다. 또한 폴리머 소재 PLC의 제작 공정은 화합물 반도체 제작 공정에 비해서 저렴하기 때문에 저가형 파장가변 레이저 다이오드의 제작에 유리하다. 결국 본 논문에서 고려하고 있는 파장 가변레이저는 기존의 브래그 격자(Bragg Grating)를 기반으로 제작된 것 보다 수율과 재현성이 더 우수할 것으로 예상되기 때문에 대량생산에 유리할 것으로 기대된다.

II. 하이브리드 집적된 레이저의 구조 및 원리

그림 1은 결합 링 반사기를 이용한 하이브리드 집적된 레이저의 개략도이다. 하이브리드 집적된 레이저는 결합 링 반사기와 반사형 반도체 광증폭기로 구성되고, 이 두 소자는 에폭시로 연결되는 능동 정렬 공정이나 링 공진기 평판 광도파 회로에 반사형 반도체 광증폭기를 집적 시키는 플립 칩(Flip-Chip Bonding) 공정으로 하이브리드 집적 될 수 있다.^[3,4] 결합 링 반사기에서 발생하는 특정 파장에서의 반사

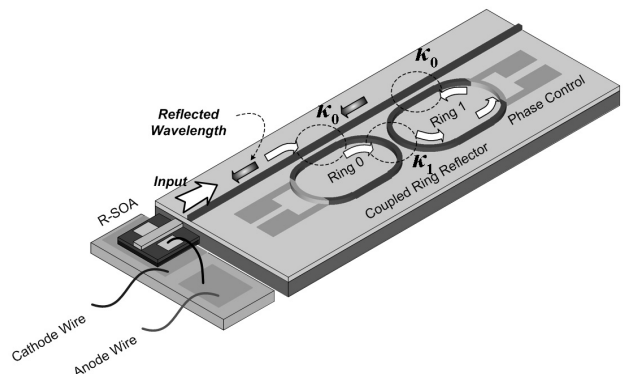


그림 1. 하이브리드 집적된 파장 가변 레이저의 개략도.

[†]E-mail: ychung@kw.ac.kr

는 다시 반사형 반도체 광증폭기로 입사되어, 반사형 반도체 광증폭기에서 발생하는 이득이 하나의 파장에만 집중되어 마치 DBR-LD(Distributed Bragg Reflector Laser Diode)와 같은 단일모드 광원으로 동작시킬 수 있다.^[5-8]

본 논문에서 제안한 파장 가변 레이저의 핵심 소자인 결합 링 반사기의 개략적인 구조 및 원리를 살펴보면 한 개의 직선 도파로와 반경이 다른 두 링 도파로가 서로 결합된 구조로 구성된다. 직선 도파로와 링 도파로, 링 도파로와 링 도파로 사이의 광 결합은 방향성 결합기(Directional Coupler)에 의해서 이루어지며, 직선 도파로를 통해 입사된 광파는 반경이 R₀인 링 도파로(Ring 0)로 결합된다. 결합된 광파는 링 도파로에서 시계방향으로 광파는 전파되고, 이 광파는 다시 반경이 R₁인 인접한 링 도파로(Ring 1)로 결합되어 반시계 방향으로 광파가 전파된다. 이 광파는 다시 직선 도파로에 결합되어 반사파 형태로 진행되게 된다. 여기서 링 공진기의 반사 출력은 직선도파로와 첫 번째 링 도파로 사이의 결합비(κ_0), 첫 번째 링 도파로와 두 번째 링 도파로 사이의 결합비(κ_1), 그리고 두 번째 링 도파로와 직선 도파로 사이의 결합비(κ_0)에 의해 결정 된다. 두 링 공진기의 반경을 약간 다르게 구성되면 반사된 광파는 두 링 공진기가 동시에 공진하는 파장에서 출력이 가장 크게 나오고 그 파장에서 벗어나수록 출력은 점차 작아진다. 결국 결합 링 반사기에서 출력되는 광파의 스펙트럼은 SGDBR과 유사한 형태의 반사 특성을 얻을 수 있기 때문에 버니어(Vernier) 효과에 의해 수십 nm에 걸친 광대역 파장 가변이 가능하다.

결합 링 반사기의 설계시 고려되었던 도파 구조는 그림 2와 같은 매립형 도파구조를 선택하였다. 코어의 폭과 높이는 각각 1.5 μm , 1.6 μm 이며, 굴절율은 1.51과 1.378로 8.36%의 높은 굴절율 차이를 갖는다. 이러한 높은 굴절율 차이는 링 도파로의 반경을 작게 할 수 있기 때문에 소형의 소자를 구현할 수 있는 기반이 된다.

광 결합 비의 조합에 결합 링 반사기를 통한 반사된 광파가 단일피크로 공진하며 반사율이 최대가 되는 광 결합 조건을 찾으면, 식 (1)과 같이 표현할 수 있으며, 이를 단일 피크 조건(Single Peak Condition)이라고 한다.^[5]

$$\kappa_1 = \frac{\sqrt{2\kappa_0^2 + 2\sqrt{2}\kappa_0 + 2\kappa_0\sqrt{1-\kappa_0^2}}}{1 + \sqrt{2}\kappa_0} \quad (1)$$

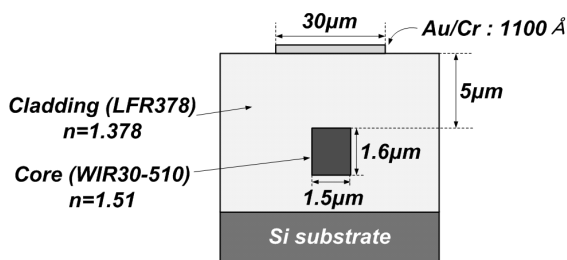


그림 2. 매립형 구조의 단면.

식 (1)에서 사용되어진 κ_0 는 직선도파로와 링도파로 사이의 결합비이며, κ_1 은 링도파로와 링도파로 사이의 결합비이다. 결합 링 반사기의 단일 피크 조건을 만족하는 광 결합비의 조합을 그림 3에 보인 실선으로 표현하였다. 즉, 실선상에 있는 점에 해당하는 결합 링 반사기의 광 결합비로 정하면 반사된 광파는 최대반사율을 가짐과 동시에 선평의 분리 없이 단일 피크로 나타나며, 단일 피크 조건에서 벗어나수록 선평의 분리 및 반사율이 작아지는 경향이 나타난다. 본 논문에서는 실선위의 수많은 광 결합 비 중 대표적으로 A, B, C의 세 조합을 고려하였다. 실제 제작에서 도파로 폭과 높이가 10% 정도의 오차범위를 갖는다고 가정하였을 때, 기존에 설계된 A, B, C의 광 결합 비에서 벗어나는 정도를 삼차원 빔 전송법(3D-Beam Propagation Method)으로 분석하고 이를 그림 3의 단일 정점 조건위에 점들로 표기하였다. 그림 3은 도파로의 폭과 높이가 각각 $\pm 0.2 \mu\text{m}$ 변화할 경우 단일 정점 조건에서 크게 벗어나지 않음을 알 수 있기 때문에 본 논문에서 고려한 결합 링 반사기의 특성은 적정한 범위 내의 공정오차에는 상당히 둔감한 반사특성을 가질 것이라고 예측 할 수 있다.

결합 링 반사기의 반사성의 척도는 파장선택성과 반사율이다. 실제 광소자를 제작할 때, 도파로를 구성하는 물질 자체 손실과 전파 손실은 항상 존재한다. 이와 더불어 링 공진기 기반의 광소자에서는 링의 반경에 의한 손실 역시 커질 우려가 있다. 결국 결합 링 공진기의 파장선택성과 반사율은 링도파로의 반경과 링 도파로에서 발생하는 손실 값에 의하여 좌우된다. 그림 4는 두 링의 반지름이 150 μm 과 156 μm 인 경우 손실에 따른 결합 링 반사기의 반사를 나타내었다. 여기서 링의 유효굴절율(n_{eff})은 1.447이고 균 굴절율(n_g)은 1.53, 중심파장(λ_0)은 1550nm, 링과 직선도파로의 결합계수(κ_0)는 0.6, 링과 링의 결합계수(κ_1)는 0.09라 가정하였다. 이상적으로 손실이 없는 링 도파로로 구성된 결합 링 반사기의 최대 반사율은 1이 되지만 점차 손실이 증가함에 따라 결합 링 반사기의 반사율이 악화됨을 알 수 있다. 또한 링 도파로에서 발생할 수 있는 문제는 링 도파로의 굽은 손실(Bending Loss)이다. 그림 5(a)에서 반경이 120 μm 이상일 경우에는 굽은 손실이 약 0.005 dB/cm 이하가 됨을 확인할 수 있었으며, 설계상에서 링의 반경에 대한 굽은 손실은 무시될 수 있을 정도

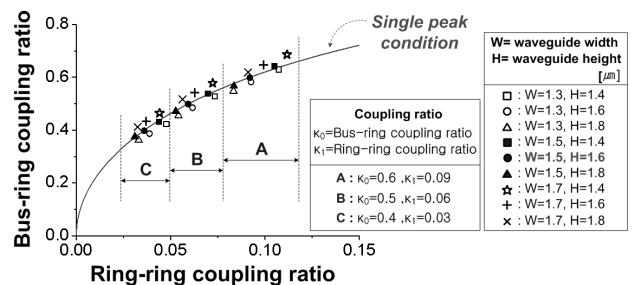


그림 3. 공정오차에 의한 결합 링 반사기 반사 특성의 변화.

로 작음을 확인하였다. 또한 제작 시 발생할 수 있는 도파로 폭 및 높이에 대해서도 링 도파로 손실을 그림 5(b)에서 예상되어질 수 있는데, 공정상 여러 가지 이유로 도파로 폭과 높이가 $\pm 0.2 \mu\text{m}$ 변한다고 가정을 하여도 링 도파로 손실은 0.01 dB/cm 이하로 무시될 정도로 작음을 확인할 수 있었다.

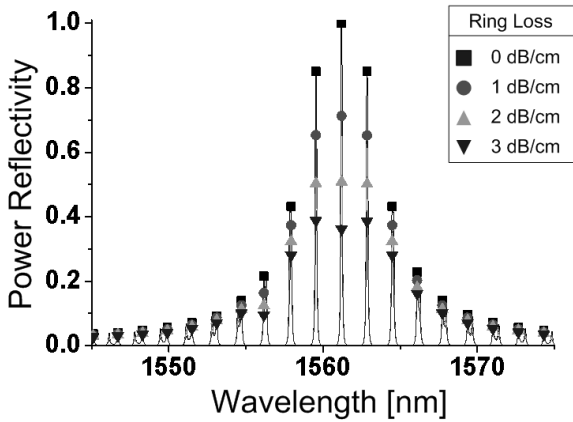
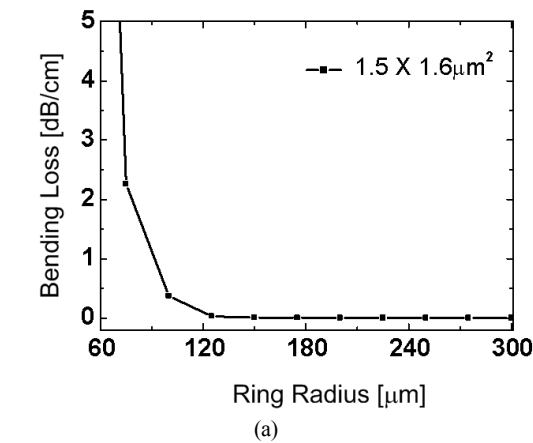
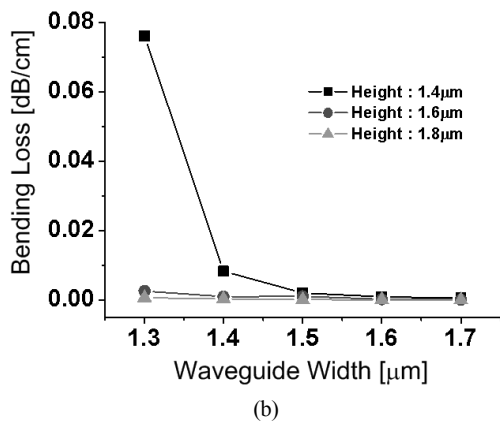


그림 4. 링 도파로의 손실에 따른 결합 링 반사기의 반사율.



(a)



(b)

그림 5. (a) 링도파로 반경에 따른 굽음 손실. (b) 도파로 폭과 높이 변화에 따른 굽음 손실.

III. 제작공정 및 측정결과

본 논문에서 채택한 매립 형 도파구조를 제작하기 위해, 코어와 클래딩은 Chem-Optics사의 WIR30-510과 LFR-378의 저손실 폴리머물질을 채택하였으며, 실리콘 웨이퍼 위에 클래딩 폴리머를 스핀코팅하여 도포하고, 포토 리소그래피 공정을 통하여 패턴을 형성한 후에 코어의 높이만큼 클래딩을 건식 식각하였다. 이렇게 형성된 코어영역에 코아에 해당하는 폴리머를 스핀코팅 공정으로 채운 후, 형성된 코어의 높이를 적절히 맞추기 위해 다시 건식 식각하였다. 그 후 클래딩 폴리머를 이용하여 상부 클래딩을 형성하였다. 각 도파로 제작 공정에서 사용되어진 폴리머는 자외선 경화(UV curing) 및 열 경화(Thermal curing) 방법을 통해 폴리머를 경화하였으며, Cr(100 Å)와 Au(1000 Å)을 이용하여 전극을 형성하였다.

이와 같이 제작되어진 결합 링 반사기를 이용하여 그림 1에 보인 바와 같이 파장 가변 레이저를 형성하였다. 이때에 사용되어진 여기서 직선 도파로와 링 도파로의 광 결합비와 링 도파로와 링 도파로 사이의 광 결합 비는 각각 0.5와 0.05로 선택되었으며, 반사형 반도체 광증폭기의 단면에는 고반사 코팅과 무반사 코팅을 하였다. 또한 반도체 광증폭기와 결합 링 반사기를 하이브리드로 제작 시 두 소자의 간격은 약 2 μm 이내이다.

그림 6은 본 논문에서 제안한 하이브리드 레이저의 L-I Curve 측정결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 임계전류는 20 mA 이고, Slope Efficiency는 약 0.1 mW/mA이다. 반사형 반도체 광증폭기에 인가되는 전류가 80 mA인 경우 출력파워는 0.4 mW로 나타났다.

그림 7은 반사형 반도체 광증폭기에 30 mA의 전류를 인가했을 때의 스펙트럼이고, 이때 외부 온도는 24°C의 상온 상태였다. 1577 nm에서 단일 모드로 발진하고 있음을 관측하였으며 이때의 부 모드 억제비(SMSR: Side Mode Suppression Ratio)는 32 dB로 나타났다.

그림 8은 그림 7의 파장 범위를 제한하여 확대 도시한 발진 스펙트럼이며, 1577 nm에서 발진하는 파장 주위로 0.6 nm 간격으로 발생하는 주기적인 모드를 확인 할 수 있다. 주기적인 모드는 반사형 반도체 광증폭기의 자체 스펙트럼에

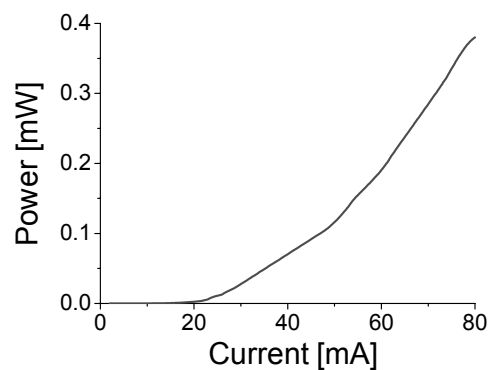


그림 6. 하이브리드 레이저의 L-I Curve.

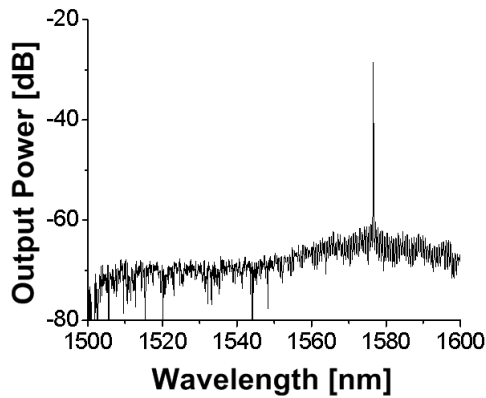


그림 7. 하이브리드 레이저의 단일 모드 특성.

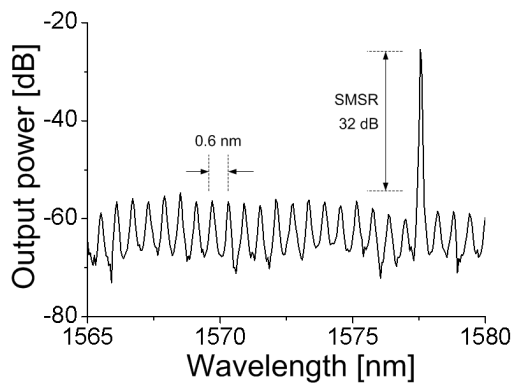


그림 8. 하이브리드 가변 레이저의 스펙트럼.

서도 확인할 수 있었기 때문에 무반사 코팅이 완벽하지 않게 제작된 것으로 볼 수 있으며, 또한 결합 링 반사기 끝단에 무반사 코팅을 수행하지 않고 하이브리드 연결되었기 때문에 반사형 반도체 광증폭기와 결합링 반사기 사이의 반사율이 증가하였다. 따라서 이러한 공진모드는 R-SOA 자체의 공진모드에 해당하며, R-SOA의 모드들 중에 하나가 선택되었음을 확인할 수 있었고, 이때 본 레이저의 FWHM은 0.05 nm로 나타났다.

광대역 파장가변을 하기 위해 먼저 하이브리드 레이저가 안정적으로 발진할 수 있도록 반사형 반도체 광증폭기와 결합 링 반사기에 TEC(Thermoelectric Cooling) Module을 장착하였다. 이때 초기 상태에서 레이저의 표면온도는 20.5°C로 고정하였다. 반사형 반도체 광증폭기로 주입되는 전류의 양을 일정하게 유지하면서, 결합 링 반사기의 위상조절 영역에 전류를 인가함으로써 하이브리드 레이저의 광대역 파장가변 특성을 측정하여 그림 9에 나타내었다. 링 공진기에 있는 위상조절영역에 전류를 가하지 않을 경우 본 레이저는 1588 nm에서 발진하게 되고, 점차 링에 인가하는 전류량이 증가할수록 발진 파장이 낮은 쪽으로 점차 이동함을 알 수 있다. 하지만 링에 인가된 전류가 37 mA에 도달하게 되면, 다시 발진파장은 처음의 1588 nm 대역으로 이동하게 된다. 하나의 링 공진기에 있는 위상 조절 영역에만 전류를 가하여 6개의

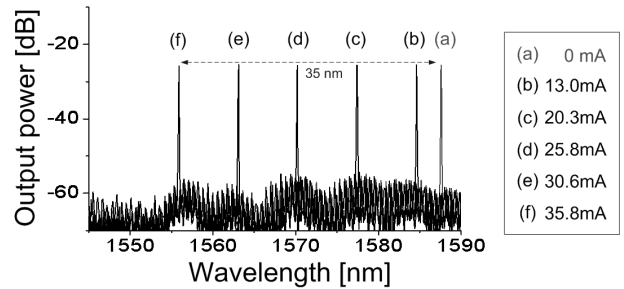


그림 9. 하이브리드 집적된 레이저의 광 대역 파장가변 특성.

발진 파장이 측정되었는데, 두 개의 링 공진기를 동시에 적절한 조합의 전류를 가하면 더 많은 발진 파장이 측정될 수 있을 것이다. 앞서 살펴본 결합 링 반사기의 파장이동 특성과 같으며, 결국 제안한 레이저의 최대 파장가변 범위는 약 35 nm가 됨을 확인하였다. 또한 광대역 파장가변을 하는 동안 발진파장은 동일한 출력을 나타내며, 일정한 SMSR을 유지하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 하나의 직선 도파로와 두 개의 링 도파로로 구성된 평판 도파로형 결합 링 반사기를 저 손실 폴리머 물질을 사용하여 제작하고, 제작된 결합 링 반사기와 반사형 반도체 광 증폭기를 하이브리드 집적하여 광대역에 걸쳐 파장 가변이 가능한 레이저 다이오드를 구현하였다. 결합 링 반사기가 실제 공정과정에서 발생할 수 있는 도파로 폭과 높이에 의한 오차에 둔감한 특성을 나타냄을 시뮬레이션을 통하여 살펴보았다.

제작된 결합 링 반사기 구조에 포함된 두 링의 반경은 각각 150 μm와 156 μm로 매우 작은 크기의 반사기를 제작하였으며, 이를 반사형 반도체 광 증폭기와 하이브리드 집적한 형태로 하여 제작 되어진 파장가변 레이저는 30 dB 이상의 SMSR을 갖는 단일 종 모드 광원임을 확인되었으며, 조절 가능한 발진 파장의 범위는 35 nm에 이르게 됨을 보였다.

감사의 말

이 논문은 한국과학재단 특정기초 연구비[R01-2006-000-10751-0] 지원에 의하여 수행 되었습니다.

참고문헌

[1] C. Lee, W. Sorin, and B. Kim, "Fiber to the Home Using a PON Infrastructure," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 24, no. 12, pp. 4568-4583, 2006.
 [2] 신흥석, 현유정, 이경우, 박성범, 신동재, 정대광, 김승우, 윤인국, 이정석, 오윤제, 박진우, "ASE 주입형 R-SOA 기반 기가급 WDM-PON 연구", *전자공학회 논문*

- 지, 43권, TC편 제5호, pp. 35-44, 2006년.
- [3] Z. Zhang, J. Liu, P. Zhao, G. Xiao, and C. Grover, "Active Alignment of Optical Fibers to Planar Waveguides Using a Thermal-Curing Adhesive," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 23, no. 2, pp. 567-571, 2006.
- [4] N. Koshoubu, S. Ishizawa, H. Tsunetsugu, and H. Takahara, "Advanced Flip Chip Bonding Techniques Using Transferred Microsolder Bumps," *IEEE Transactions on Components and Packaging Technology*, vol. 23, no. 2, pp. 399-404, 2000.
- [5] Y. Chung, D. Kim, and N. Dagli, "Reflection Properties of Coupled-Ring Reflectors," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 24, no. 4, pp. 1865-1874, 2006.
- [6] Z. Bian, B. Liu, and A. Shakouri, "InP-Based Passive Ring-Resonator-Coupled Lasers," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 39, no. 7, pp. 859-865, 2003.
- [7] Y. Chung, D. Kim, and N. Dagli, "Widely Tunable Coupled-Ring Reflector Laser Diode," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 17, no. 9, pp. 1773-1775, 2005.
- [8] 윤필환, 김수현, 정영철, "결합 링 반사기 레이저 다이오드의 광대역 파장 가변 및 변조 특성 해석", *한국광학회지*, vol. 17, no. 6, pp. 544-547, 2006.

Hybrid-integrated Tunable Laser Diode Using Polymer Coupled-ring Reflector

Joonoh Park, Taehyung Lee, and Youngchul Chung[†]

Department of Electronics and Communications Engineering, Kwangwoon University, Seoul, Korea

[†]*E-mail: ychung@kw.ac.kr*

(Received May 13, 2008; Revised manuscript June 3, 2008; Accepted June 5, 2008)

To realize a widely tunable laser diode, a polymer coupled-ring reflector is hybrid-integrated with reflective semiconductor optical amplifier. Even though ring-ring and ring-bus coupling ratios are changed by fabrication errors in waveguide width and height, they remain very close to the single peak condition, ensuring high yield in fabrication. The tuning range is observed to be about 35 nm, maintaining the side mode suppression ratio of about 30 dB.

OCIS codes: (140.3600) Lasers, tunable; (160.5470) Polymers; (230.5750) Resonators.