

폴리머 링 공진기 기반의 가감필터 반사기와 반사형 반도체 광 증폭기가 하이브리드 집적된 파장 가변 레이저

이 호 · 김건우 · 정영철[†]

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

김수현

한국과학기술연구원
Ⓞ 136-791 서울특별시 성북구 하월곡동 39-1

(2009년 6월 25일 받음, 2009년 8월 4일 수정본 받음, 2009년 8월 4일 게재 확정)

본 논문에서는 고굴절률차 폴리머 도파로를 이용하여 이중 링 공진기 가감필터(Add/Drop Filter) 반사기를 설계하고 제작하였다. 이 가감필터 반사기를 반사형 반도체 광 증폭기와 하이브리드 집적함으로써 저가형 파장가변 레이저를 제작하고 그 측정 결과를 분석하였다. 이중 링 공진기 반사기는 서로 다른 반경을 가진 두 개의 링 공진기로 인하여 선택적인 반사 특성을 가지게 되며, 버니어 효과로 인하여 넓은 파장가변 특성을 가질 수 있다. 반사형 반도체 광 증폭기와 능동 정렬을 통하여 제작된 하이브리드 집적 파장가변 레이저는 26 dB의 부 모드 억제율과 0.03 nm의 선폭을 가지며 단일 모드로 발진하였다. 또한 25 mA의 전류를 이중 링 공진기 가감필터 반사기 상부에 형성된 전극에 인가하여 총 17 nm의 파장가변을 측정하였으며, 파장가변 과정에서 부 모드 억제율은 일정하게 유지됨을 확인하였다.

Hybrid-integrated Tunable Laser Using Polymer-ring Resonator-based Add/Drop Filter Reflector and Reflective Semiconductor Optical Amplifier

Ho Lee, Gun Woo Kim, and Youngchul Chung[†]

Department of Electronics and Communications Engineering, Kwangwoon University
447-1 Wolgye-Dong, Nowon-Gu, Seoul 139-701, Korea

[†]E-mail: ychung@kw.ac.kr

Suhyun Kim

Korea Institute of Science and Technolgy 39-1 Hawolgok-Dong, Seongbuk-Gu, Seoul, 136-791, Korea

(Received June 25, 2009; Revised manuscript August 4, 2009; Accepted August 4, 2009)

In this paper, a low-cost hybrid-integrated tunable laser is realized using a polymer-ring resonator-based add/drop filter reflector and a reflective semiconductor optical amplifier. The add/drop filter reflector, composed of a double-ring resonator with different radii, can have characteristics of selective wavelength reflection and wide wavelength tuning with an aid of vernier effect derived from the radii difference. By hybrid-integrating the reflective semiconductor optical amplifier with the add/drop filter reflector, a tunable laser can be realized through an active alignment method. The hybrid laser exhibited a single mode lasing with side mode suppression ratio of 26 dB and full width half maximum of 0.03 nm. In addition, applying a low current as small as 25 mA onto electrodes over add/drop filter reflector, a wavelength tuning range of 17 nm could be obtained.

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

OCIS codes: (140.3600) Tunable lasers; (160.5470) Polymers; (230.3120) Integrated optics devices; (230.7390) Planar waveguides;

[†]E-mail: ychung@kw.ac.kr

I. 서 론

현재 사용중인 시분할 방식의 E-PON (Ethernet-passive optical network)은 전송량에 한계가 있기 때문에 기가 비트 급의 대용량 초고속 가입자망을 구성하기 위해서는 WDM-PON (Wavelength division multiplexing-PON)이 가장 적합한 솔루션이라 할 수 있다.^[1] WDM-PON에서는 각 가입자마다 주어진 고유한 파장으로 데이터 통신을 하기 때문에 안정적으로 동작하는 단일파장 레이저 다이오드가 각 가입자의 광원으로 사용 되어야 한다. 이러한 단일파장 레이저 다이오드의 사용은 WDM-PON의 구성 및 유지보수비용의 증가를 유발시키며, 결국 보안성, 확장성, 그리고 무한한 전송용량의 장점을 보유한 WDM-PON의 상용화를 지연시키는 요인으로 지적 받고 있다.^[2] 하지만 가입자마다 파장가변 레이저가 사용된다면 망의 확장이 용이해지고, 파장자원을 효율적으로 사용할 수 있어 유지보수비용을 절감할 수 있다. 이러한 파장가변 광원에 대한 연구는 앞으로의 비용 효율적인 광대역 가입자 망 전송 시스템을 구성하기 위해서는 매우 중요하다고 할 수 있다. 그에 따라, 지금까지 SG-DBR 레이저 다이오드 등의 단일집적 파장가변 레이저에 대한 연구가 진행되어 왔다.^[3-5] 하지만 광대역 파장가변과 안정적인 단일모드 발진 등의 우수한 성능에도 불구하고 이러한 단일집적 파장가변 레이저는 WDM-PON에 적용되기에는 아직도 적정 가격에 미치지 못하고 있다. 한편, 최근에는 능동 소자인 반사형 반도체 광 증폭기(Reflective semiconductor optical amplifier : R-SOA) 혹은 초 발광 레이저 다이오드(Superluminescent laser diode : SLD)와 수동 소자인 평판 도파로 기반의 파장 선택 반사기를 집적하여 파장가변 레이저를 제작하는 하이브리드 집적 방법이 저가형 파장가변 레이저를 위한 방안으로 주목 받고 있다.^[6-11]

본 논문에서는 저가형 파장가변 레이저를 제작하기 위해 선택적 반사 특성을 지닌 마이크로 링 공진기 기반의 가감필터(Add/drop filter) 반사기를 제작하고, 이것을 반사형 반도체 광 증폭기와 하이브리드 집적함으로써 광대역 파장가변 레이저를 구현하였다. 특히 파장 선택 반사기에 일반적으로 사용되는 수백 nm 주기의 격자구조를 대신하여 작은 크기, 우수한 광 신호 처리, 그리고 고밀도 집적이 가능한 마이크로 링 공진기^[12]를 기반으로 파장 선택 반사기를 제작하였다. 또한 제안된 파장 선택 반사기는 단순한 구조와 넓은 파장 범위에서 균일한 반사 특성을 지닌 루프 백 미러(Loopback mirror)를^[7] 링 공진기 기반의 가감필터와 단일 집적한 구조로써, 고반사(High reflection : HR) 코팅의 추가작업 없이도 우수한 반사특성을 가질 수 있기 때문에 대량생산에 용이할 것으로 기대된다. 본 연구에서는 열광학 특성이 우수한 저손실 폴리머 물질을 이용하여 파장 선택 반사기를 제작하였으며, 동시에 링의 반경이 다른 이중 링 공진기 구조를 적용하여 버니어 효과를 유발^[13], 이를 이용해 광대역 파장가변이 가능하도록 하였다. 한편 반사형 반도체 광 증폭기는 최근 WDM-PON용 광원으로 활발한 연구가 진행 되고 있는 소자

로서 비교적 저가에 공급될 가능성이 있다. 본 논문의 II장에서는 제안된 파장가변 레이저의 구조와 동작원리를 간략하게 설명하고, III장에서는 파장 선택 소자인 이중 링 공진기 가감필터 반사기의 설계에 관하여 논한 후, 이어서 IV장에서 제작된 파장가변 레이저를 측정하여 얻은 결과들을 분석하여 정리하였다.

II. 하이브리드 집적 파장가변 레이저의 구조 및 동작 원리

제안된 하이브리드 집적 파장가변 레이저의 개략도를 그림 1에 나타내었다. 링 공진기 기반의 파장 선택 반사기와 반사형 반도체 광 증폭기로 구성되어 있으며, 능동 정렬 방식을 이용하여 집적하였다. 특히 파장 선택 반사기인 이중 링 공진기 가감필터 반사기는 이중 링 공진기 가감필터와 루프 백 미러로 구성되어 있다.^[14] 이중 링 공진기 가감필터는 두 링 공진기의 반경이 서로 같지 않으므로 두 링의 FSR(Free spectral range)과 공진 파장 또한 다르게 된다. 결국 두 링의 공진 조건을 동시에 만족하는 파장에서 강한 필터링이 발생하고 그 파장을 중심으로 점차 약하게 필터링된 파장들이 주기적으로 나타나게 된다. 이렇게 선택적으로 필터링 된 파장 성분들은 루프 백 미러에 의해 다시 입사포트로 진행하여 결국 반사형 필터를 구성하게 된다.

여기서 루프 백 미러는 그림 2(a)와 같이 방향성 결합기와 링 도파로로 구성된 구조이며, 포트 1과 2를 통해 빛의 입사와 방출이 이루어진다. 입사 포트를 통하여 주입된 광파는 결합기에 의해 분기된 후 각기 다른 방향으로 링 도파로를 진행하고, 다시 방향성 결합기를 통하여 입사되었던 포트와 나머지 포트를 통해 광파가 방출된다. 특히 결합기의 결합 비율은 루프 백 미러의 반사 성능에 있어 중요한 요소로 작용한다. 그림 2(b)는 포트 1로 빛이 입사 되었을 때 결합기의 결합 비율에 따른 각 포트에 방출되는 광파의 크기 변화를

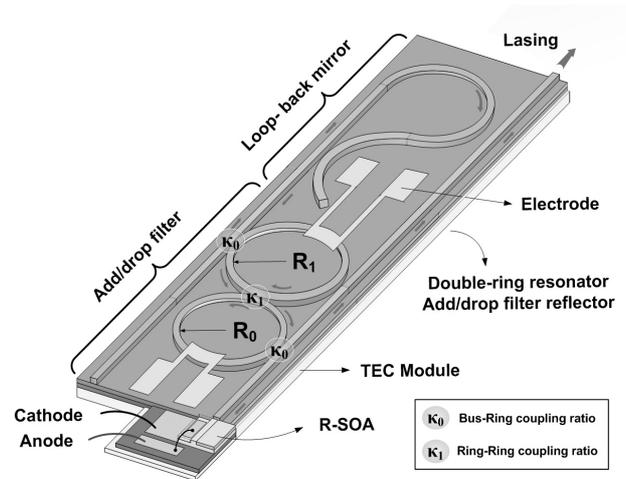


Fig. 1. Schematic configuration of the proposed hybrid-integrated tunable laser.

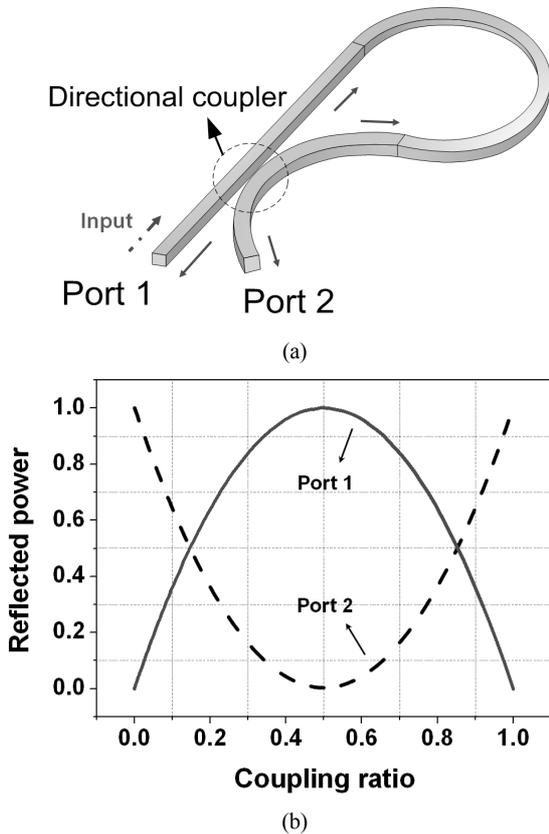


Fig. 2. (a) Loop-back mirror (b) Reflected power of each port when increasing coupling ratio.

보여주고 있으며, 만약 3 dB 결합기로 루프 백 미러를 설계한다면 포트 1에서는 진행한 두 광파가 위상이 일치하여 100%의 파워가 반사되고, 포트 2에서는 진행한 광파가 위상이 어긋나게 되어 방출되는 광파가 존재하지 않는다. 한편, 방향성 결합기의 결합 비율이 30% 정도로 저하되는 경우에도 80%의 반사율은 얻을 수 있음을 그림 2(b)를 통하여 알 수 있고, 이는 제작 공정 오차에 의한 반사율 저하는 제한적임을 시사한다.

또한 열광학(Thermo-optic) 특성이 우수한 폴리머를 이용하여 반사기를 제작함으로써 전류 주입으로 발생하는 전극의 열을 이용해 링 공진기 주변의 굴절률을 조절해 각 링 공진기의 FSR 및 공진 파장을 변화시킬 수 있다. 이로써 얻을 수 있는 버니어 효과는 넓은 범위의 파장가변이 가능하도록 해주며 식 (1)과 같이 각 링 공진기의 반경 R_0 , R_1 , 균 굴절률 n_g , 중심파장 λ_0 를 이용하여 파장가변 범위의 계산이 가능하다.

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

제작된 파장 선택 반사기와 반사형 반도체 광 증폭기가 집적되면, 증폭기에서 발생한 광대역 파장 성분들이 파장 선택 반사기로 결합되고 그 빛은 이중 링 공진기와 루프 백 미러

를 통하여 특정 파장 성분들만이 다시 증폭기로 피드백된다. 피드백된 파장 성분들 중 반사 파워가 가장 강한 파장에 이득이 집중되게 되며 이런 과정의 반복을 통해 이득이 집중된 파장의 빛이 집중적으로 발진하게 된다.

III. 이중 링 공진기 가감필터 반사기의 설계

제안된 파장 선택 반사기를 구성하는 링 공진기에 있어서 작은 반경의 링 공진기는 넓은 반경을 가진 것들 보다 FSR이 넓어서 상대적으로 넓은 파장가변 범위 및 파장 선택성과 같은 우수한 파장특성을 가질 수 있다. 논문에서 제안한 파장 선택 반사기는 그림 3과 같은 도파로 단면 구조를 가지고 있다. 1.5 μm 와 1.6 μm 의 폭과 높이로 설정된 코어와 클래딩은 캐뎀텍스사의 WIR30-510($n=1.51$)과 LFR-378($n=1.378$)의 폴리머 물질을 각각 사용하였다. 특히 8.7%의 높은 굴절률차를 가진 도파로 구조는 광파를 코어에 효율적으로 가둘 수 있기 때문에 결과적으로 그림 4에 보인 바와 같이 무시할 수 있을 정도의 굽음 손실을 가진 150 μm 반경의 링 공진기를 구현 할 수 있으며, 이는 넓은 FSR을 가진 링 공진기 및 소형의 소자를 제작할 수 있도록 해준다. 또한 루프 백 미러는 3 dB 결합기와 150 μm 반경의 굽은 도파로로 구성하여, 저손실과 고반사 특성을 갖도록 하였다. 공진기 주변의 클래딩 위에는 30 μm 의 폭과 1100 \AA 의 높이의 Cr/Au메탈을 형성함으로써 전류 인가를 통한 폴리머의 열광학 효과를 얻

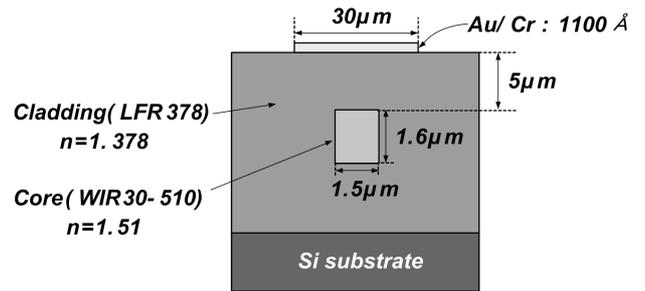


Fig. 3. Waveguide cross-section of double-ring-resonator add/drop filter reflector.

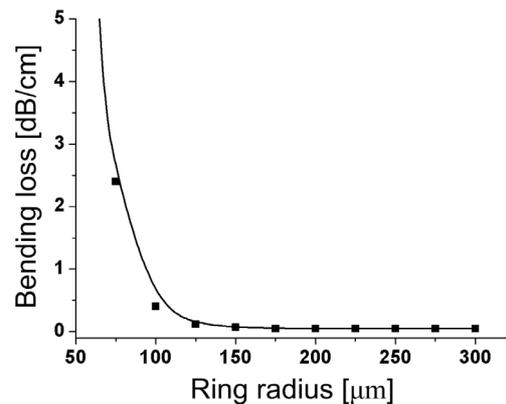


Fig. 4. Bending loss versus radius.

을 수 있도록 하였다.

한편 파장 선택 반사기의 파장 선택성과 가변 범위는 완성된 하이브리드 집적 레이저의 부 모드 억제율(Side mode suppression ratio : SMSR)과 파장가변 범위와 같은 성능들에 영향을 미치는 중요한 요소로 작용한다. 그 성능들은 파장 선택 반사기에 존재하는 방향성 결합기의 결합비율과 두 링 공진기 사이의 반경 차에 의존한다. 실제 제안된 링 공진기 기반 파장 선택 반사기는 총 3개의 방향성 결합기(두 개의 버스-링 결합기, 한 개의 링-링 결합기)를 가지고 있으며 그림 5의 실선으로 도시된 최대 평탄 조건(Maximally flat condition)^[15]이라 불리는 상호 간의 적절한 결합비율 쌍을 통하여 단일 피크의 반사 스펙트럼을 나타내게 된다. 그리고 이 조건을 만족하는 결합 비율을 높여가며 반경 차이에 따라 파장 선택성을 계산한 결과가 그림 5에 다양한 선으로 도시되어 있다. 그림과 같이 최대 평탄 조건을 만족하는 결합비율이 높아 질수록 파장 선택성이 낮아져서 최대 피크와 두 번째 피크와의 선택성이 악화됨을 알 수 있으며, 결합비율에 따른 선택성은 반경 차이가 클수록 우수함을 알 수 있다. 하지만 반경 차이에 따른 파장 선택성과 가변 범위를 계산한 그림 6과 같이 반경 차이가 클수록 선택성은 좋아지지만 가변 범위가 좁아지며, 결합비율이 작을 경우가 반경 차이에 따른 선택성이

우수함을 알 수 있다. 종합해보면 우수한 파장 반사 특성과 가변 범위를 위해서는 결합비율과 링 반경 차이와의 관계를 고려하여 링 반경을 설정해야 할 필요가 있으며, 위의 결과를 고려하여 본 논문에서는 링 공진기의 반경을 각각 150 μm , 156 μm 로 선택하였고 버스-링 과 링-링 결합기의 결합비율을 각각 0.4, 0.09로 설정 하였다.

위의 계산을 통하여 설정된 결합 비율을 갖도록 각 결합기는 두 도파로 사이의 간격이 1.5 μm 로 고정된 상태에서 적정 길이의 직선 도파로가 삽입된 구조로 설계하였다. 하지만 스핀 코팅과 식각 같은 공정 과정에서 도파로의 폭과 결합기 사이의 간격이 설계 값과 다르게 제작되어 설정된 각 결합비율이 다르게 제작될 가능성이 상존한다. 따라서 제안된 반사기의 결합기는 설계 과정에서 공정 오차로 인한 $\pm 0.2 \mu\text{m}$ 의 도파로 폭 변화에 따른 결합 비율의 변화를 미리 계산하여 공정오차에 상당히 둔감한 결합기를 제작하고자 하였으며, 공정 오차가 있어도 설계된 결합비율 즉, 최대 평탄 조건에 크게 벗어나지 않는 결합 비율을 나타내는 것을 계산 결과 확인하였다.^[16]

IV. 하이브리드 집적 레이저의 측정 결과

설계된 이중 링 공진기 파장 선택 반사기는 다음과 같이 제작 되었다. 실리콘 웨이퍼 위에 스핀 코터를 이용해 LFR-378을 도포하여 하부 클래딩 층을 형성하고, 그 위에 패터닝된 코어 영역을 건식 식각 하였다. 스핀 코터를 이용하여 형성된 코어 패턴 트렌치에 WIR30-510을 채우고, 코어 영역 밖의 WIR30-510을 제거하기 위해 다시 건식 식각을 수행하였다. 그 상부에 LFR-378을 코팅하여 상부 클래딩 층을 형성하고 마지막으로 Cr/Au 메탈을 상부 클래딩 층위에 형성하였다.

제작된 파장 선택 반사기는 그림 1과 같이 반사형 반도체 광 증폭기와 능동 정렬을 통하여 하이브리드 집적을 수행하였으며 이중 링 공진기 반사기의 통과 포트(Through port) 측 버스 도파로와 단일 모드 광섬유의 정렬을 통하여 발진 특성을 측정하였다. 측정 과정에서 파장 선택 반사기의 동작 특성은 폴리머의 우수한 열광학 특성으로 인해 주변 온도 변화에 상당히 민감할 수 있으며, 반사형 반도체 광 증폭기 또한 활성층의 온도 상승으로 인해 균일하지 않은 발진 특성을 나타낼 우려가 있다. 이러한 온도 변화의 영향을 최소화하고 신뢰성 있는 측정 결과를 도출하기 위해 하이브리드 집적된 레이저 하부에 TEC(Thermoelectric cooling) 모듈을 장착하여 반사형 반도체 광 증폭기는 17 $^{\circ}\text{C}$, 파장 선택 반사기는 20 $^{\circ}\text{C}$ 의 온도를 유지하였다.

$$FSR = \frac{\lambda_0^2}{2m_g R} \quad (2)$$

그림 7은 제작된 이중 링 공진기 가감필터 반사기의 측정 결과를 보여준다. 측정된 반사기의 공진 파장 간격은 1.38

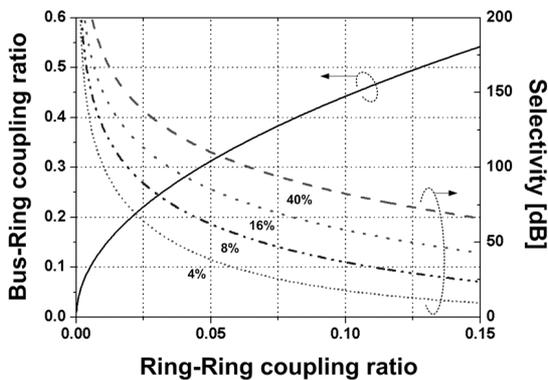


Fig. 5. Maximally flat condition and wavelength-selectivity versus coupling ratio.

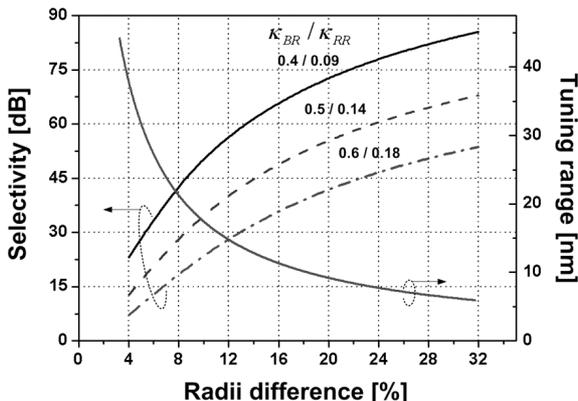


Fig. 6. Waveguide-selectivity and tuning range as a function of relative difference of ring radii.

nm로 나타났다. 이 측정값은 식 (2) 와 같이 계산되는 각 링 공진기의 FSR과 다소 차이가 있는데, 이는 직선과 링 도파로 사이의 효율적인 결합을 위해 삽입된 직선 도파로의 길이로 인해 증가한 링 공진기의 주회길이 때문에 발생하는 것이다. 식 (2) 에서 λ_0 는 중심 파장, n_g 는 공진기의 군 굴절률, $2\pi R$ 은 링 공진기의 주회길이를 나타낸다. 또한 제작된 반사기의 파장 선택성은 약 0.24(약 4.3 dB)로 측정 되었지만, 이 값은 그림 6에서 계산된 동일한 조건에서의 파장 선택성과 비교할 때 상당히 낮은 값을 알 수 있다. 이러한 차이는 측정 과정에서 발생하는 삽입 손실과 도파 손실, 그리고 결합기에서 발생하는 손실로부터 발생하는 것으로 여겨진다.

그림 8은 제안된 하이브리드 집적 레이저의 L-I 곡선의 측정 결과이다. 그림과 같이 160 mA까지 전류를 인가하였음에도 레이저의 파워는 약 14 μ W로 작게 측정되었다. 이렇게 낮은 파워를 보이는 이유 중에 하나는 이중 링 공진기 가감

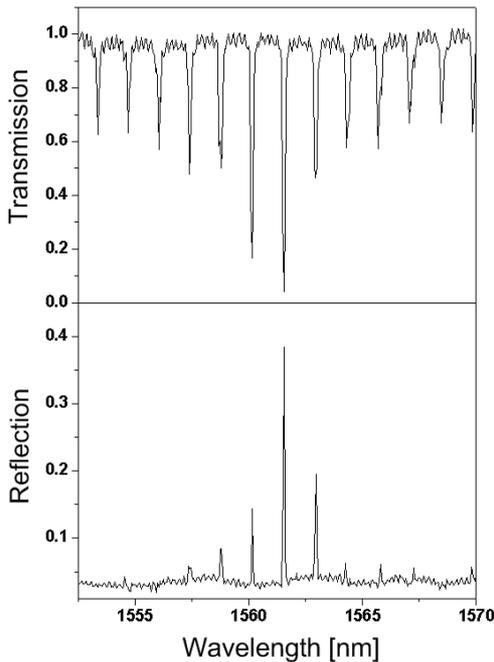


Fig. 7. Reflection and through characteristics of the fabricated double-ring-resonator add/drop filter reflector.

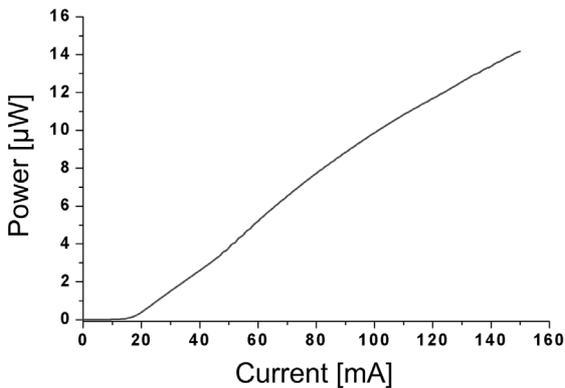


Fig. 8. Light-power versus current curve of the hybrid laser.

필터 반사기의 통과와 반사 특성의 측정 결과를 나타낸 그림 7을 통하여 확인 할 수 있다. 그림에서와 같이 가장 강한 반사를 나타내는 파장에서 약 3%의 통과 값을 가짐을 알 수 있다. 출력 파워를 증가시키기 위해서는 루프 백 미리의 결합비율을 조정하여 반사율을 50~70%로 줄이고 루프 백 미리의 잔여 포트를 통하여 출력을 얻을 필요가 있다.

그림 9는 반사형 반도체 광 증폭기에 40 mA의 전류를 인가 했을 때의 하이브리드 집적 레이저의 발진 스펙트럼이다. 제안된 레이저는 1560.3 nm에서 단일 모드로 발진하며 26 dB의 부 모드 억제율과 0.03 nm의 선폭을 나타내었다. 한편 스펙트럼 상의 발진 파장 근처에서 0.6 nm주기를 갖는 모드들이 관찰되었다. 이와 같은 모드 간격의 모드들은 반사형 반도체 광 증폭기 자체의 발진 스펙트럼에서도 확인 가능하며, 반사형 반도체 광 증폭기 한쪽 단면의 무반사 코팅이 완벽하게 수행되지 않음으로 인해 발생한 잔여 반사가 그 원인으로 추정된다.

제안된 하이브리드 집적 레이저의 파장가변 특성을 측정한 결과는 그림 10과 같다. 파장가변 특성을 측정하기 위해 우선 반사형 반도체 광 증폭기에 주입되는 전류를 일정하게 유지하였고, 이중 링 공진기 가감필터 반사기의 한쪽 링 공진

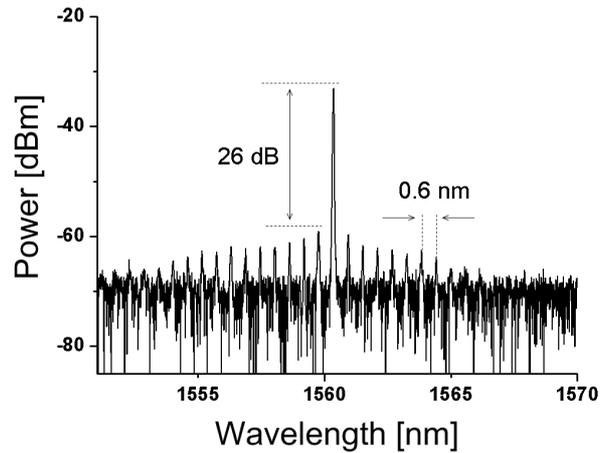


Fig. 9. Lasing spectrum of the hybrid-integrated tunable laser.

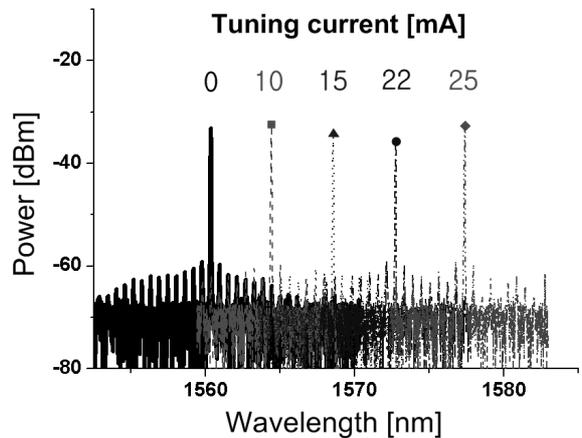


Fig. 10. Superimposed lasing spectrum for various tuning currents.

기 상부에 형성된 전극으로 전류를 인가하여 공진기를 진행하는 빛의 위상을 조절하였다. 전극에 주입되는 전류의 양을 증가시킬수록 발진 파장이 장파장 쪽으로 이동하였으며 25 mA의 전류인가를 통하여 17 nm의 파장가변 범위를 얻을 수 있음을 확인하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 폴리머 링 공진기 기반의 파장 선택 반사기와 반사형 반도체 광 증폭기가 집적된 저가형 하이브리드 집적 파장가변 레이저를 제안하였다. 고 굴절률차 폴리머 도파로를 이용하여 약 150 μm 반경에도 작은 굽음 손실을 갖도록 하였으며, 파장 선택성과 가변 범위 사이의 상호관계에 대한 계산을 통해 결합비율과 링 반경들을 적절하게 선택하였다. 제작된 파장 선택 반사기는 능동 정렬을 통하여 반사형 반도체 광 증폭기와 하이브리드 집적 되었으며, 단일 모드로 발진하는 것을 측정을 통해 확인할 수 있었다. 또한 25 mA 정도의 전류를 인가하여 발진 파장을 17 nm 가변 시킬 수 있었다. 하지만 제안된 하이브리드 집적 레이저는 이중 링 공진기 가감필터 반사기의 높은 드롭 특성 때문에 발진 파워가 낮게 측정되었다. 만약 파장 선택 반사기의 루프 백 미러 반사율을 50~70%로 줄이고, 루프 백 미러의 잔여 포트에서 발진 특성을 측정한다면 높은 파워를 확인할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2008-313-D00701)

References

1. C. Ollivry, "Why fiber? Why now?," FTTH Council Europe, Montpellier (2004).
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," *IEEE J. Lightwave Technol.* **24**, 158-165 (2006).
3. L. A. Coldren, "Monolithic tunable diode lasers," *IEEE J. Select Topics Quantum Electron.* **6**, 988-999 (2000).
4. L. A. Coldren, G. A. Fish, Y. Akilova, J. S. Barton, L. Johansson, and C. W. Coldren, "Tunable semiconductor lasers: a tutorial," *IEEE J. Lightwave Technol.* **22**, 193-202 (2004).
5. S. Kim, Y. Chung, S. Oh, and M. Park, "Design and analysis of widely tunable sampled grating DFB laser diode integrated with sampled grating distributed Bragg reflector," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16**, 15-17 (2004).
6. K. Kato and Y. Tohmori, "PLC hybrid integration technology and its application to photonic components," *IEEE J. Select Topics Quantum Electron.* **6**, 4-13 (2000).
7. M. Takahashi, Y. Deki, S. Takaesu, M. Horie, M. Ishizaka, K. Sato, K. Kudo, K. Suzuki, T. Kaneko, X. Xu, and H. Yamazaki, "A stable widely tunable laser using a silica-waveguide triple-ring resonator," in *Proc. Opt. Fiber Commun. Conf.* (Anaheim, CA, USA, 2005), PDP19.
8. J. Shin, S. Oh, Y. Park, S. Park, Y. Han, H. Sung, and K. Oh, "External cavity laser composed of higher order gratings and SLDs integrated on PLC platform," *ETRI J.* **29**, 452-456 (2007).
9. 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).
10. 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).
11. S. Oh, J. Shin, Y. Park, S. Park, K. Kim, S. Kim, H. Sung, Y. Beak, and K. Oh, "Wavelength-tuning of hybrid integrated multiwavelength laser using a heater," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **20**, 422-424 (2008).
12. D. Kim, Y. Choi, J. Yi, Y. Chung, C. Ozturk, and N. Dagli, "Multimode-interference-coupled ring resonators based on total-internal-reflection mirrors," *Jpn. J. Appl. Phys.* **46**, 175-181 (2007).
13. G. Griffel, "Vernier effect in asymmetrical ring resonator array," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **12**, 1642-1644 (2000).
14. 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).
15. B. E. Little, S. T. Chu, H. A. Haus, J. Foresi, and J. P. Laine, "Microring resonator channel dropping filters," *IEEE J. Lightwave Technol.* **15**, 998-1005 (1997).
16. D. Lee, T. Lee, J. Park, S. Kim, and Y. Chung, "Widely tunable double-ring-resonator add/drop filter," *Hankook Kwanghak Hoeji (Korean J. Opt. Photon.)* **18**, 216-220 (2007).