

## 결합 링 반사기 레이저 다이오드의 광대역 파장 가변 및 변조 특성 해석

윤필환<sup>†</sup> · 김수현 · 정영철

광운대학교 전자통신공학과

Ⓞ 139-701 서울특별시 노원구 월계동 447-1 참빛관 712

(2006년 11월 21일 받음, 2006년 11월 21일 수정본 받음)

본 논문에서는 기존의 DBR 격자 기반의 파장선택성 반사기를 대체시킬 수 있는 결합 링 반사기가 집적된 레이저 다이오드를 연산자 분리 시 영역 모델을 통해서 분석한다. 결합 링 반사기는 브래그 격자(Bragg grating) 필요로 하지 않는 평판 도파로 형태의 반사기이다. 결합 링 반사기는 하나의 직선 도파로와 두 개의 결합된 형태의 링 공진기가 하나의 직선 도파로에 결합되어 있다. 위상 조절 전류의 조절에 따른 파장 가변 범위는 수십 nm 정도가 되고, 파장 가변 과정에서 부모드 억압비도 35 dB 이상이 됨을 수치 해석을 통해 확인했다. 또한 결합 링 반사기 레이저 다이오드는 종래의 레이저 다이오드에 비해서 유효 공진기 길이(Effective Cavity Length)가 매우 길기 때문에 진폭 변조 시 20 - 30 GHz 주파수 영역에서 추가적인 공진 특성을 보이고, 이 특성으로 인해 진폭 변조 대역폭이 상당히 향상될 수 있으리라 기대된다.

주제어 : Tunable laser, Semiconductor laser, Microring, Optoelectronics

### I 서 론

파장 가변 레이저는 WDM 시스템, 스위칭, 그리고 차세대 전광(all-optical) 네트워크 등에 쓰일 수 있는 필수적인 요소이다. 또한 최근에는 optical coherence tomography(OCT)라는 바이오 광학 분야에서도 파장 가변 레이저의 응용에 관한 연구가 이루어지고 있다. 현재 까지 격자(Grating) 구조 기반의 파장 가변 레이저들이 상업적으로 많이 사용되고 있지만, 격자 구조를 포함하기 때문에 에피 구조가 복잡하다는 공정상의 어려움을 가지고 있다.<sup>[1]</sup> 따라서 이와 같은 문제들을 해결하기 위해서 파장 가변 레이저 구현을 위하여 미소 링 공진기(Microring resonator)를 이용하려는 연구가 이루어지고 있다. 미소 링 공진기는 다른 소자들과 집적하기가 쉬우며, 컴팩트한 크기로 만들 수 있다는 장점을 가지고 있다. 이와 같은 특징을 바탕으로 최근에 제안되고 있는 링 결합 레이저들은 좋은 파장 가변성과 좁은 선폭 특성을 보일 것으로 기대되고 있다.<sup>[2]</sup>

하나의 직선 도파로와 두 개의 링 도파로로 구성된 결합 링 반사기(Coupled-Ring Reflector: CRR)가 최근에 소개되었다.<sup>[3]</sup> CRR은 브래그 격자(Bragg grating)를 필요로 하지 않는 평판 도파로 형태의 반사기이다. 결합 링 반사기는 서로 결합된 두 개의 링 도파로와 하나의 직선 도파로로 구성이 된다. CRR은 브래그 격자와 비슷한 수준의 좁고 높은 반사율을 제공하며, 두 링 도파로의 주회 길이가 약간 다를 경우 매우 넓은 범위의 반사 파장을 가변시킬 수 있다. 따라서 CRR은 광 대역 파장 가변 레이저 구현에 적용하기 위한 파장 선택 소자로서 좋은 대안이 될 수 있다.

그림 1과 같은 구조의 결합 링 반사기 레이저 다이오드의 개념은 이미 실험적으로 증명된 바 있지만, 세부적인 분석은 아직 이루어 지지 않았다.<sup>[5-7]</sup> 본 논문에서는, CRR 레이저 다이오드의 특성을 연산자 분리 시영역 모델(Split-Step Time Domain Model: SS-TDM)을 이용하여 분석하였다.<sup>[4]</sup> 본 논문의 구성은 2장에서는 CRR 레이저 다이오드의 구조 및 동작 원리를 기술했고, 3장에서는 수치 해석을 통한 레이저 다이오드의 정/동적 특성을 설명하고, 4장에서는 결과를 종합 하였다.

### II. CRR 레이저 다이오드의 구조 및 동작원리

본 논문에서 제안한 레이저 다이오드의 구조를 그림 1에 보였다. CRR 레이저 다이오드의 링 공진기 내부에서 발생하는 각종 손실을 보상하기 위해서는 공진기 안에 증폭 영역을 집적하여야 하며, 또한 위상 조절을 위한 수동 영역이 존재해야 한다. 수동 영역에 전류를 주입하여 위상을 조절하게 되고, 증폭영역에 전류 인가를 해줌으로써 증폭을 발생시킨다. 한편 버니어(Vernier) 효과에 의해 수 십 nm에 걸친 광대역 파장 가변을 위하여 두 링의 주회 길이가 약간 다르게 구성된다. 직선 도파로의 오른쪽에 위치한 CRR이 파장 선택성 반사기로 동작하는 이유는 다음과 같다. 직선 도파로와 첫 번째 도파로에서 커플링 된 빛이 두 개의 링 도파로에서 결합이 되고, 다시 그 빛의 일부가 직선 도파로에 결합이 되어 레이저 펌핑 영역으로 반사가 된다. 이 때 CRR의 두 공진기의 주회 길이가 약간 다르기 때문에 두 공진기의 FSR (Free Spectral Range)이 다르며, 공진하는 파장들 또한 약간 어긋난다. 이 경우에 두 공진기의 공진하는 파장이 일치할 때만 강한 반사가 일어난다. 그러므로 한쪽 링 공진기에서의 공진

<sup>†</sup> E-mail: ychung@kw.ac.kr

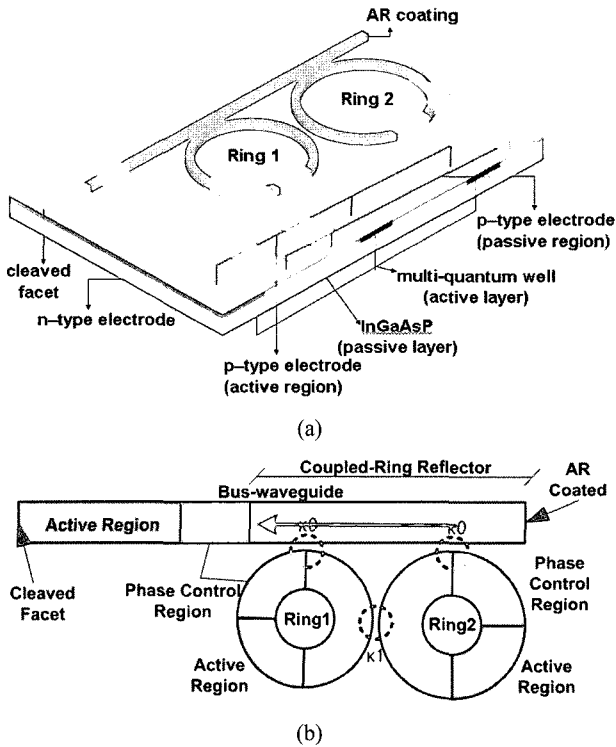


그림 1. 논문에서 제안한 레이저 다이오드에 개략도.  
 (a) CRR 레이저 다이오드의 개략도.  
 (b) 수치해석에서 고려한 CRR 레이저 다이오드의 개략도.

파장 간격 만큼의 변화는 한 FSR 만큼의 반사 파장 이동을 유발 시킨다. 이와 같은 버니어 효과를 이용하기 때문에 도파로 내의 작은 굴절률 변화만으로도 넓은 범위의 파장 가변이 가능하다. 작은 굴절률 변화만으로도 파장 가변이 가능하기 때문에 전류 인가에 따른 내부 손실이 상대적으로 작다. CRR의 한쪽 링 공진기의 굴절률은 그대로 유지하면서, 다른 링 공진기의 굴절률을 변화시키면, 두 링의 특정 공진하는 파장의 최대 반사율 파장을 불연속적으로 선택할 수 있다. 또한 두 링 공진기의 굴절률을 동시에 적절히 바꾸어 줌으로써 연속적인 반사 파장 가변이 가능하다.

두 링의 이득영역은 링 도파로의 재료 특성 및 구부러짐으로부터 생기는 도파 손실을 보상하기 위해 삽입되었고, 직선 도파로의 위상조절영역은 레이저 다이오드의 공진기 모드를 조절하는 역할을 한다. 직선 도파로 오른쪽 단면으로부터의 잔류 반사율은 CRR의 파장 가변 범위에 영향을 미칠 수 있기 때문에, 반사를 막기 위해서 오른쪽 단면에는 무반사(Anti-Reflection) 코팅 처리가 된 것으로 고려한다.

### III. 수치해석 결과

제안한 레이저 다이오드의 동작 특성들을 예측하기 위해서 연산자 분리 시영역 모델을 사용하여 수치해석을 수행하였다.<sup>[4]</sup> 수치해석 모델에서 도파로는 일정한 간격을 가지는 섹션으로 분리가 되며, 전자밀도가 매 시간 단계 마다 울 방정

표 1. 수치해석에 고려한 레이저 다이오드의 파라미터

Spontaneous Recombination Coefficient	$B$	$1.0 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$
Auger Carrier Recombination Coefficient	$C$	$1.3 \times 10^{-28} \text{ cm}^6 \text{ s}^{-1}$
Transparency Carrier Density	$N_0$	$1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
Linewidth Enhancement Factor	$\alpha_m$	3.2
Waveguide Loss in Lasing Section	$\alpha$	$25 \text{ cm}^{-1}$
Effective Group Refractive Index	$n_{eff}$	3.7
Waveguide Confinement Factor	$\Gamma$	0.2
Ring-Bus Coupling Coefficient	$k_0$	0.5
Ring-Ring Coupling Coefficient	$k_0$	0.06
Differential Gain	$g_n$	$6.0 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$
Strip width	$w$	1.5 $\mu\text{m}$

식을 통하여 업데이트 된다. 계산된 전자 밀도로부터 이득과 굴절률이 계산되고 광자밀도와 위상 변화가 수치적으로 계산된다. 그 후에 도파로들 사이에서 일어난 결합효과가 고려된다. 이 과정은 미리 정해진 시간 동안 반복 수행된다. 이때, 직선도파로 전체 길이는  $750 \mu\text{m}$ 이고, 두 링 도파로의 반경은 각각  $50, 52 \mu\text{m}$ 로 가정한다. 이 경우에 파장가변 향상지수(tuning enhancement factor)는 26이며, 이것은 특정한 파장을 가변을 하기 위해 필요한 굴절률 변화량이 버니어 효과를 이용하지 않을 때보다 26배 작고 파장 가변 범위는 FSR의 26배 정도 된다는 것을 의미한다.<sup>[3]</sup> FSR이 약  $2.17 \text{ nm}$ 이므로, 가능한 파장 가변 범위는 약  $55 \text{ nm}$  정도이다. 시뮬레이션에서 이득 층(Active Layer)의 두께는  $0.1 \mu\text{m}$ 로 가정하였다. 시뮬레이션 시 링 도파로의 구부러짐 및 물질 손실은  $25 \text{ cm}^{-1}$ 로 고려했다. 표 1의 링-링, 직선-링 결합 비율은 단일 피크 반사 조건을 만족시키도록 선택했다.<sup>[3]</sup> 직선도파로의 이득 영역과 위상조절 영역의 길이는 각각  $250, 75 \mu\text{m}$ 로 고려했다. 두 링 공진기의 이득 영역과 위상조절 영역의 길이는  $75 \mu\text{m}$ 로 같다. 시뮬레이션을 위해 도파로가 나누어지는 섹션의 길이는  $7.5 \mu\text{m}$ 이다.

그림 2는 한 쪽 링의 위상조절 영역에만 전류를 인가해 가면서 확인한 파장 가변과 SMSR(side mode suppression ratio) 특성이다. 시뮬레이션 결과는  $3 \text{ mA}$  정도로 적은 양의 위상조절 전류 변화를 통하여  $33 \text{ nm}$ 의 파장 가변이 된다는 것을 보여준다. 이때, 두 링 공진기의 이득 전류는  $5 \text{ mA}$ 로 같으며, 직선도파로의 이득영역에 인가된 전류는  $150 \text{ mA}$ 이다. 파장 가변범위는 위상조절영역에 인가된 전류에 의한 손실과 CRR의 반사스펙트럼의 대역폭이 충분히 작지 않기 때문에 제약을 받게 된다.<sup>[3]</sup> SMSR은 일반적으로  $35 \text{ dB}$  이상을 유지하지만, 특정한 전류 값에서는 그렇지 못하다. 이 경우에는 직선도파로의 위상조절영역에 인가 전류를 조정함으로써 이를 향상시킬 수 있다.

CRR 레이저 다이오드의 진폭 변조 특성을 조사하였다. 이

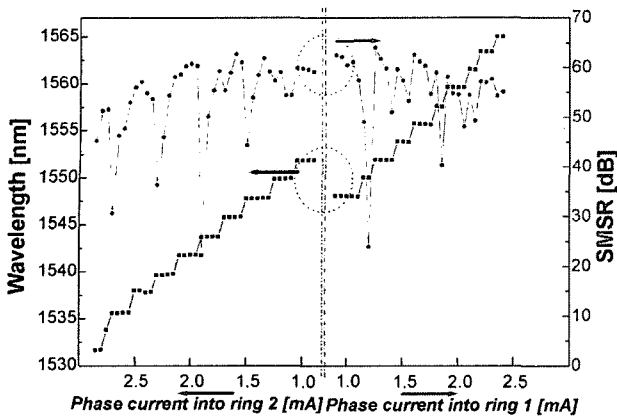


그림 2. 제한한 레이저 다이오드의 동작원리 링 공진기 위상조절 영역 인가 전류에 따른 파장 가변 특성.

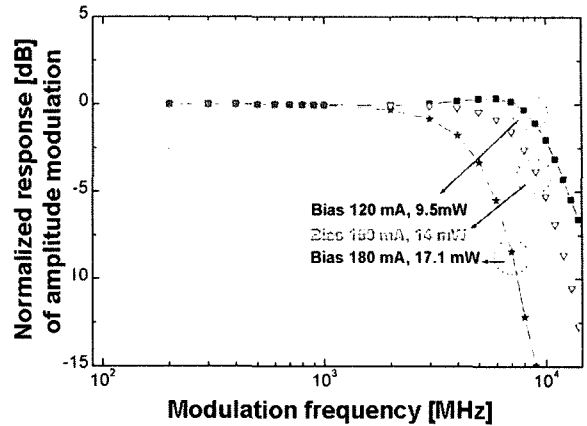


그림 4. CRR 레이저 다이오드의 진폭 변조 특성.

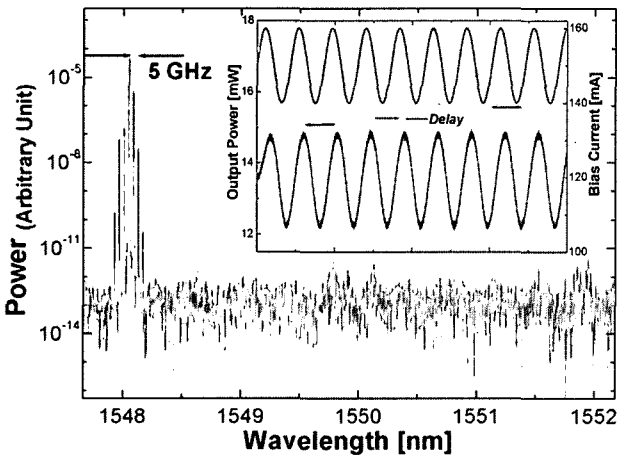


그림 3. 150mA 바이어스 전류에서 5GHz 변조 특성.

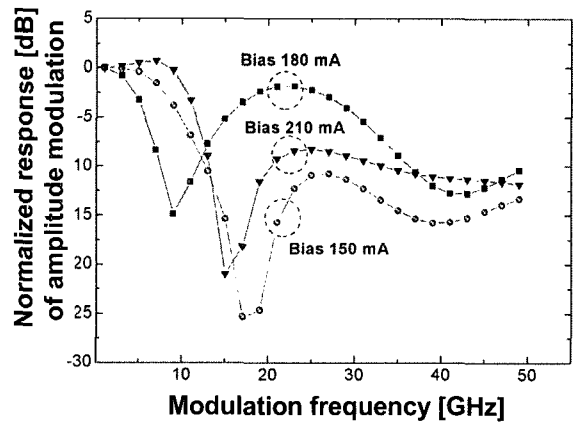


그림 5. 넓은 주파수 범위에서 CRR 레이저 다이오드의 진폭 변조 특성.

특성을 알아보기 위해서 직선도파로의 이득영역에 정현파를 인가하여 변조되는 광 신호의 특성을 살펴보았다. 인가 전류의 진폭은 20mA(peak-to-peak), 바이어스 전류는 150mA로 가정하였다. 그림 3은 5GHz 주파수의 정현파를 레이저 다이오드에 인가했을 때의 출력과 응답 그래프 이다. 그림 3 내부의 작은 그림에서 위쪽 그림은 5GHz의 인가 전류, 아래쪽 그림은 변조된 광 출력을 의미한다. 레이저 다이오드의 광 출력이 인가 전류에 대응하여 잘 변조되고 있음을 확인할 수 있다.

그림 4는 변조주파수의 변화에 따른 진폭 변조 응답 특성이다. 응답은 200MHz 주파수에서의 응답을 기준으로 정규화 하였다. 변조대역폭은 바이어스 전류(출력파워)에 따라 5~10GHz 정도임을 알 수 있다. 바이어스 전류 증가와 함께, 변조 대역폭은 줄어들게 됨을 관측할 수 있는데, 이것은 종래의 레이저 다이오드와는 다른 특징이다.<sup>[9]</sup> 그 이유는 링 공진기에서 발생하는 빛의 세기가 커지면, 링 공진기 이득 영역의 캐리어의 수를 감소시키고 결과적으로 굴절률 증가를 수반하게 된다. 그 결과 공진기 내부의 빛의 세기가 작았을 때는 서로 일치하였던 두 링 공진기의 공진 파장이 점차

어긋나게 되어 CRR의 반사율 저하를 가져올 수 있다. CRR의 반사율이 저하는 레이저 다이오드의 완화진동(relaxation oscillation) 주파수의 감소를 초래하게 되며, 변조 대역폭이 감소하게 된다.

그림 5는 50GHz 에 이르는 높은 주파수 범위에서 CRR 레이저 다이오드의 응답 특성을 나타내었다. 진폭변조 특성은 1GHz 주파수에서의 응답을 기준으로 정규화 하였다. 결과를 보면 20~30GHz 주파수 대역에서 광자-광자 공진 효과에 의한 추가적인 공진 피크들이 관찰된다.<sup>[11]</sup> 이 값들은 상당히 긴 유효 공진기 길이(effective cavity length)를 갖는 CRR 레이저 다이오드의 발진 모드 간격과 근사적으로 같다.<sup>[4]</sup> 추가적인 photon-photon 공진 현상과 그것을 이용하는 높은 주파수 대역에서도 동작할 수 있는 긴 공진기 DBR 또는 외부 공진기 레이저 다이오드에 관한 연구가 이미 이루어진 바 있다. 이들 레이저 다이오드에서들과 마찬가지로 부 모드(side mode)들 간의 광자-광자 공진 효과를 이용하면 CRR 레이저 다이오드의 변조 가능한 주파수 영역이 상당히 확대될 수 있다는 것을 예상 할 수 있다.<sup>[10,11]</sup>

#### IV. 결 론

본 논문에서는 하나의 직선 도파로와 두 개의 링 도파로로 구성된 결합 링 반사기(coupled-ring reflector : CRR) 가 집적된 레이저 다이오드를 시영역에서 분석하였다. CRR 레이저 다이오드를 분석하기 위해서 연산자 분리 시영역 모델을 사용하였다.<sup>[2]</sup> 두 링의 주회길이를 약간 다르게 설계한 CRR 구조를 반사기로 적용하는 경우, 한 쪽 링의 위상조절 전류를 3mA 정도 변화시킬 때, 버니어 효과에 의하여 2.17nm 간격으로 18개의 발진 파장을 얻어 약 33nm의 가변범위를 나타내는 것을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다. 또한 CRR 레이저 다이오드의 유효 공진기 길이가 수천 마이크로 정도 길기 때문에 부 모드(Side Mode)들 간 간격이 통상적인 레이저 다이오드에서 보다 매우 조밀하게 나타날 수 있으며, 이 부 모드들 간의 광자-광자 공진 현상을 이용하면, 진폭 변조 대역폭이 수 십 GHz까지 늘어날 수 있음을 확인하였다. CRR 레이저 다이오드는 격자 제작 공정이 없이 간소화된 공정으로 제작할 수 있을 뿐만 아니라, 수십 nm 정도의 광대역 파장 가변 및 광대역 진폭 변조 특성 등으로 인하여, 광통신 및 광 신호 처리를 위한 새로운 개념의 파장 가변 레이저로서의 역할이 기대된다.

#### 감사의 글

이 논문은 2005년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2005-041-D00570). 이 논문은 2006년도 광운대학교 교내 학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

#### 참고문헌

- [1] L. A. Coldren, "Monolithic tunable diode lasers," *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 6, no. 6, pp. 988-999, 2000.
- [2] 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.
- [3] Y. Chung, D. Kim, and N. Dagli, "Reflection properties of coupled-ring reflectors," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 24, no. 4, pp. 1865-1874, 2006.
- [4] B. Kim, Y. Chung, J. Lee, "An efficient split-step time-domain dynamic modeling of DFB/DBR laser diodes," *Journal of Quantum Electronics*. vol. 36, no. 7, pp. 787-794, 2000.
- [5] 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.
- [6] B. Liu, A. Shakouri, and J. Bowers, "Wide tunable double ring resonator coupled lasers," *IEEE Photonics Technology Letters*. vol. 14, no. 7, pp. 600-602, 2002.
- [7] S. J. Choi, Z. Peng, Q. Yang, E. H. Hwang, and P. D. Dapkus, "A Semiconductor Tunable Laser Using a Wavelength Selective Reflector Based on ring Resonators," *Proceedings of Optical Fiber Conference, Post-deadline Paper PDP20*, Anaheim, California, USA, 2005.
- [8] Jean-Pierre Weber, "Optimization of the carrier-Induced effective index change in InGaAsP waveguide-Application to tunable Bragg filters," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 30, no. 8, pp. 1801-1816, 1994.
- [9] K. Petermann, *Laser diode modulation and noise* (Kluwer Academic Publishers), Chap. 4, 1991.
- [10] G. Morthier, R. Scharz, and O. Kjebon, "Extended modulation bandwidth of DBR and external cavity lasers by utilizing a cavity resonance for equalization," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 36, no. 12, pp. 1468-1475, 2000.
- [11] L. Bach, W. Kaiser, J. P. Reithmaier, A. Forchel, M. Gioannini, V. Feies, and I. Montrosset, "22-GHz Modulation Bandwidth of Long Cavity DBR Laser by Using a Weakly Laterally Coupled Grating Fabricated by Focused Ion Beam Lithography," *IEEE Photonics Technology Letters*. vol. 16, no. 1, pp. 18-20, 2004.

### Wide Tuning and Modulation Characteristics Analysis of Coupled-Ring Reflector Laser Diode

Pilhwan Yoon<sup>†</sup>, Suhyun Kim and Youngchul Chung

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

<sup>†</sup>*E-mail: ychung@kw.ac.kr*

(Received November 21, 2006, Revised manuscript November 21, 2006)

A time-domain modeling approach is used to study characteristics of a widely tunable coupled-ring reflector (CRR) laser diode (LD). The CRR consists of a bus waveguide and two coupled ring resonators coupled to the bus without resorting to distributed Bragg grating structure. The tuning range can be a few tens of nanometers with a side mode suppression ratio exceeding 35dB through the adjustment of currents into the phase control sections in the rings. The CRR laser diode has long effective cavity length compared to conventional laser diodes. Accordingly, a broad additional resonance peak in the amplitude modulation characteristics is observed between 20 to 30 GHz, implying the extension of amplitude modulation bandwidth.

OCIS code : 230.3120, 230.0250, 140.3600, 130.3120.