《연구논문》 Korean Journal of Optics and Photonics, Vol. 28, No. 5, October 2017, pp. 229-235
DOI: https://doi.org/10.3807/KJOP.2017.28.5.229
ISSN : 1225-6285(Print)
ISSN : 2287-321X(Online)

Design and Analysis of U-shaped Sampled Grating Distributed Bragg Reflector Lasers

Kyoungrae Kim and Youngchul Chung†

ECE Department, Kwangwoon University, 120 Gwangun-ro, Nowon-gu, Seoul, Korea

(Received July 13, 2017; Revised August 7, 2017; Accepted August 9, 2017)

A widely tunable U-shaped SGDBR (Sampled Grating Distributed Bragg Reflector) laser diode is designed and analyzed by means of a time-domain simulation. The U-shaped SGDBR laser diode consists of SGDBR, active, phase, and TIR (Total Internal Reflection) mirror sections, so the coupling losses across the sections should be carefully considered. The tuning range of the designed U-shaped SGDBR laser is about 1525-1570 nm, which is confirmed by the simulation. The simulation results show that the loss in the TIR mirror region should be less than about 2 dB, and the refractive-index difference at the butt coupling between the passive and active regions should be less than 0.1, to provide the complete tuning range.

Keywords: SGDBR laser diodes, Total internal reflection mirror, Tunable lasers, Distrituted Bragg reflector
OCIS codes: (140.2020) Diode lasers; (140.3490) Lasers, distributed-feedback; (140.3600) Lasers, tunable

U형 Sampled Grating DBR 레이저 다이오드의 설계 및 분석

김경래 · 정영철†

광운대학교 전자통신공학과
㉾ 01897 서울시 노원구 광운로 120

(2017년 7월 13일 받음, 2017년 8월 7일 수정본 받음, 2017년 8월 9일 게재 확정)

U형 구조의 SGDBR (Sampled Grating Distributed Bragg Reflector) 레이저 다이오드를 설계하고, 시간 영역 시뮬레이션 방법으로 해석하였다. U형 구조의 SGDBR 레이저 다이오드는 SGDBR, 능동, 수동, TIR (Total Internal Reflection) 거울 영역들로 이루어져 있어서, 각 영역들 간의 결합 손실의 영향을 면밀히 고려하여야 한다. 설계된 U형 SGDBR 레이저 다이오드의 파장 가변 범위는 1525 nm에서부터 1570 nm 로서 시뮬레이션을 통하여 확인하였다. 설계 튜닝 범위에서 완전한 레이저 다이오드 특성을 얻기 위해서는, 미러 영역에서의 손실은 약 2 dB 이하이고, 능동 및 수동 영역 간 butt 결합에서의 매질 간 굴절률 차이는 0.1 이하를 유지하도록 도파 구조가 설계되어야 한다.

Keywords: SGDBR 레이저 다이오드, 전반사 미러, 파장 가변 레이저, 분포 브래그 반사기
OCIS codes: (140.2020) Diode lasers; (140.3490) Lasers, distributed-feedback; (140.3600) Lasers, tunable

I. 서 론

광대역 파장 가변 레이저 다이오드는 WDM (Wavelength Division Multiplexing) 광통신 네트워크를 구성하는 데 있어서 고정 파장 레이저 다이오드에 비하여 상당한 이점을 제공한다. 즉, 파장가변 레이저 다이오드를 광통신 시스템의 광원으로 사용할 경우 네트워크 계획을 용이하게 하고, 백업용 광원의 수를 상당히 줄일 수 있게 하며, 동적으로 파장을 제공할 수 있을 뿐만 아니라 네트워크 제어 소프트웨어를 단순화할 수 있는 등의 많은 이점을 얻을 수 있다. 생산성 측면에서 보면 특정 파장의 단일 모드 레이저 다이오드를 생산하기 위해서는 해당 파장에 따라 적정한 조건으로 공정이 진행되어야 하지만 파장 가변 레이저 다이오드는 제작 후 파장 튜닝이 가능하기 때문에, 제작 공정 기술의 향상에 따라서 파장 가변 레이저 다이오드가 수율 측면에서 유리해 지는 경향이 있다. 이에 따라서 파장가변 레이저 다이오드는 DWDM (Dense WDM) 기반의 장거리 기간망 광통신 시스템 및 메트로 광통신 시스템 뿐만 아니라 WDM 수동 광 네트워크 기반의 가입자 광통신 시스템에 이르기까지 많은 광통신 시스템을 구축하기 위한 필수적인 소자로 인식되고 있다[1-5].

현재까지 여러 종류의 파장가변 레이저 다이오드가 제안되고 개발되었으며, 대표적인 파장가변 레이저 다이오드는 SG

†E-mail: ychung@kw.ac.kr
Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

(Sampled Grating) 또는 SSG (Super Structure Grating) DBR (Distributed Bragg Reflector) 레이저 다이오드, TTG (Tunable Twin Guide) 레이저 다이오드, GCSR (Grating assisted Codirectional coupler with rear Sampled grating Reflector) 레이저 다이오드, ECL (External Cavity Laser) 등이 있다[6-11]. 현재 여러 파장가변 레이저 다이오드 중 SGDBR 레이저 다이오드는 파장가변 범위가 넓으며(>70 nm)[12], 비교적 간단한 구조를 가지는 레이저 다이오드로 상용화에 성공한 우수한 레이저 다이오드이다. 또한 EA (Electro-Absorption) 변조기 및 SOA (Semiconductor Optical Amplifier) 등을 집적한 소자에 대한 연구 개발이 활발히 진행된 바 있다[13,14].

본 논문에서는 SGDBR 레이저 다이오드의 변형된 구조인 U형 SGDBR 레이저 다이오드를 소개하고, 시간 영역 모델로 해석하여 적정한 파장 가변 특성을 나타내기 위한 제작 조건에 대하여 논의한다. U형 SGDBR 레이저 다이오드는 소자의 중간에 식각 전반사 거울 두 개를 삽입하여 파장 선택용 SGDBR 두 개가 상하에 존재하도록 함으로써, 소자의 길이가 기존의 직선형 SGDBR 레이저 다이오드에 비하여 반 정도로 짧으며, 광 출력 방향이 동일하므로 집적화된 트랜시버 소자를 구현하는데 용이한 등의 이점이 있다[15]. 시간 영역 모델 시뮬레이션을 통하여 U형 SGDBR 레이저 다이오드의 전반사 미러 영역에서의 손실, 능동 영역과 수동 영역 간 결합 효율의 감소 및 두 영역의 굴절률 차이에 따른 파장 가변 특성의 열화에 대하여 살펴본다. 이 결과를 토대로 적정한 파장 가변 특성을 유지하기 위한 제작 조건을 제시한다.

II. U형 SGDBR 레이저 다이오드의 구조

집적 광대역 파장 가변 U형 SGDBR (Sample Grating Distributed Bragg Grating) 레이저 다이오드의 개략적인 구조를 그림 1에 보였다. 통상적인 SGDBR 레이저 다이오드는 일반적으로 이득영역, 미세 파장 가변을 위한 위상 영역, 파장 선택을 위한 SGDBR 미러(mirror) 영역 등으로 구성된다. 이중 이종 접합(Double Hetero-junction) 반도체 도파로 영역으로의 전류 주입에 의한 전자 정공 캐리어 밀도의 조절에 따른 굴절률 변화, 상단 발열 패드에의 전류 인가에 의한 온도 변화에 따른 굴절률 변화 등의 메카니즘을 이용하여 이 영역들의 물리적 파라미터를 조절할 수 있다. 단일 DBR 이

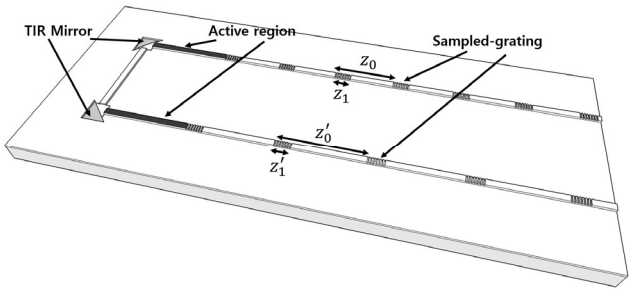

Fig. 1. Schematic configuration of a U-shaped SGDBR laser diode.

특정 파장에서 한 개의 반사 피크를 발생시키는 것에 비하여, SGDBR 미러는 다수의 반사 피크가 주기적으로 발생하게 된다. 반사 피크의 발생 주기는 추출 격자 주기(Sampled grating period)에 반비례한다. 두 개의 SGDBR의 추출 격자 주기를 약간 다르게 함으로써, 두 SGDBR로 부터의 반사 피크의 주기가 약간 어긋나게 된다. 전자 정공 밀도 조절 또는 열 조절을 통하여 한 쪽 SGDBR 영역의 굴절률을 변화시키면, 해당 SGDBR로 부터의 반사 스펙트럼이 이동하게 되고, 약간의 굴절률 변화에 의하여 반사 피크 한 주기 만큼의 발진 파장 튜닝이 가능하게 된다. 이와 같은 버니어(Vernier) 효과에 의한 파장 가변 범위(두 SGDBR 반사 피크의 겹침이 반복되는 파장 범위) $\Delta\lambda_{rep}$는 아래 식과 같다.

$$\Delta\lambda_{rep} = \frac{\lambda}{2n_g(Z_0' - Z_0)} \tag{1}$$

여기에서 Z_0와 Z_0'은 두 SGDBR에서 추출 격자의 주기, n_g는 군 굴절률이며, λ는 반사 스펙트럼의 중심파장이다. 버니어 효과에 의하여 발생하는 파장 가변 확대 지수(Tuning enhancement factor)는 $Z_0/(Z_0' - Z_0)$와 같다[16]. 그림 1에 보인 바와 같이, 기존 SGDBR 레이저 다이오드의 구조와 비교하여 U형 SGDBR 레이저 다이오드는 능동 영역 중간에 에칭 공정으로 구현되는 전반사 거울을 배치하여 레이저 다이오드의 구조가 U자 형태로 되어 있다. 이러한 구조로 인하여 U형 SGDBR 레이저 다이오드는 기존 SGDBR 레이저 다이오드보다 소자 길이를 절반 정도 줄일 수 있어 웨이퍼 당 생산성이 우수해 대량 생산에 용이하다. 또한, 기존 SGDBR 레이저 다이오드의 출력은 좌우 양단으로 발생하기 때문에 집적 소자 설계에 있어 두 출력을 동시에 활용할 수 없어서 QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) 코히어런트 통신용 집적 소자 설계 및 제작을 위한 공간 활용성이 떨어진다. 반면, U형 SGDBR 레이저 다이오드 구조는 두 개의 출력단이 동일한 방향을 향해 있으므로 공간 활용 면에서 우수하여 집적화에 유리하므로, 향후 QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) 코히어런트 트랜시버 등의 광집적 소자를 구현하기에도 유리한 구조이다[15].

U형 SGDBR 레이저 다이오드는 기존 SGDBR 레이저 다이오드와 동일한 방식으로 동작하나, 중앙의 전반사 미러 구조에서 광 파워 손실이 불가피하게 발생한다. 따라서 U형 SGDBR 레이저 다이오드를 설계 및 제작할 때는 전반사 미러 영역에서의 광 손실이 최소화되도록 하여야 한다. 또한, 능동 영역과 수동 영역 사이의 버트(butt) 결합 경계 설계의 한 예시는 그림 2와 같은 형태로 수동 도파로 영역을 재성장(regrowth) 하여 제작하는 경우가 많다. 그림 2의 경우에는 우물(well) 영역의 굴절률 3.6, 장벽(barrier) 영역의 굴절률 3.4를 고려하면 다중 양자 우물(Multiple Quantum Well, MQW)의 평균 굴절률은 3.52 정도로서, 수동 영역과의 굴절률 차이는 약 0.12 정도이다. 이 버트 결합 경계에서의 결합 효율

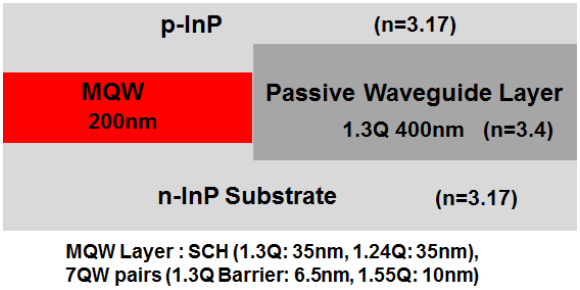

Fig. 2. Illustration of epitaxial layer structure across butt joint interface after regrowth.

의 감소 및 두 영역의 굴절률 차이에 따른 파장 가변 특성의 열화가 발생하지 않도록 에피 층(epitaxial layer) 구조 설계 및 재성장된 도파구조 설계에 있어서 주의를 기울여야 한다.

III. 시간 영역 해석 모델

도파로 내에서 존재하는 전계는 다음과 같이 주어진다.

$$E(z,t)=[F(z,t)e^{-j\beta_o z}+R(z,t)e^{-j\beta_o z}]e^{j\omega_o t} \tag{2}$$

여기서 ω_o는 임의의 중심 주파수이고, β_o는 브래그(Bragg) 주파수에서의 전파상수를 나타낸다. 여기서 $F(t,z)$와 $R(t,z)$는 각각 도파로의 진행축인 z축을 따라 순방향으로 진행하는 전계와 역방향으로 진행하는 전계 진폭을 나타내며, 아래의 시간변수가 있는 결합 파동방정식을 만족하게 된다.

$$\frac{1}{c_g}\frac{dF(z,t)}{dt}+\frac{dF(z,t)}{dz}= \tag{3.1}$$
$$(g-i\delta-\alpha_0/2)F(z,t)+i\kappa R(z,t)+S_f(z,t)$$

$$\frac{1}{c_g}\frac{dR(z,t)}{dt}-\frac{dR(z,t)}{dz}= \tag{3.2}$$
$$(g-i\delta-\alpha_0/2)R(z,t)+i\kappa^{*}R(z,t)+S_r(z,t)$$

여기서 $F(t,z)$와 $R(t,z)$는 크기와 위상을 포함하고 있는 복소수 형태이고 c_g는 군속도를 나타내며 κ는 브래그 격자의 역방향 결합계수를 나타낸다. α_o는 도파로의 손실계수를 나타낸다. S_f와 S_r은 자발방출 잡음을 나타내는 전계로 레이저 다이오드 발진시 구동원으로 작용하게 된다. g는 전계이득(field gain)을 나타내는 파라미터로 다음 식으로 정의 된다.

$$g(t,z)=\frac{\Gamma g_N(N(t,z)-N_o)}{2(1+\epsilon P)} \tag{4}$$

여기서 Γ는 도파로 내에서의 구속인자(confinement factor)를 나타내고, g_N은 캐리어의 밀도 변화에 따른 이득의 변화량을 나타낸다. $N(t,z)$는 캐리어 밀도(carrier density), N_0는 임계전류(threshold current)에서의 캐리어 밀도, P는 광자 밀도(photon density), 그리고 ϵ는 이득 억제 계수(gain suppression coefficient) 이다. δ는 브래그 조건에서 어느 정도 벗어나 있는지를 나타내는 detuning factor이며 캐리어 밀도 변화에 따른 굴절률 변화에 의해 아래와 같이 변하게 된다.

$$\delta=-\frac{1}{2}\Gamma\alpha_m g_N(N(t,z)-N_0). \tag{5}$$

위의 식에서 α_m은 선폭증가인자(linewidth enhancement factor)이다. 식 (1)의 시간의존 파동 방정식으로부터 파워가 보존되는 개선된 유한 차분 알고리즘은 아래와 같다[17,18].

$$F(z+\Delta z,t+\Delta t)=G\Delta zF(z,t)+\exp(-i\delta\Delta z)F(z,t) \tag{6.1}$$
$$+i\kappa\Delta zR(z,t)+S_f\Delta z$$

$$R(z-\Delta z,t+\Delta t)=G\Delta zR(z,t)+\exp(-i\delta\Delta z)R(z,t) \tag{6.2}$$
$$+i\kappa^{*}\Delta zF(z,t)+S_r\Delta z$$

앞의 모든 파라미터들은 시간에 따른 캐리어 밀도의 변화에 의해 변하게 되고 이러한 시간에 따른 캐리어 밀도의 변화는 비율 방정식(rate equation)에 의해 주어지게 된다.

$$\frac{dN}{dt}=\frac{J}{ed}-BN^2-CN^2-\frac{c_g g_N(N-N_o)P}{1+\epsilon P} \tag{7}$$

여기서 J는 전류 밀도, e는 전하량, d는 활성층의 두께, B는 전자-정공 재결합 계수(binary recombination coefficient), C는 Auger 재결합 계수를 나타낸다. 한편, 능동 영역과 수동 영역사이의 butt 결합 경계면에서는 전달 행렬 방법을 통하여 모드 결합 효율 및 매질 굴절률 차이의 효과를 고려한다.

IV. U형 SGDBR 레이저 다이오드의 특성 시뮬레이션

전반사 미러 영역의 손실, 능동 영역과 수동 영역 사이 결합 효율 및 굴절률 차이가 파장 가변 특성에 미치는 영향을 확인하기 위하여, 표 1에 열거된 파라미터 값들을 가지는 U형 SGDBR 레이저 다이오드를 고려하였다. U형 SGDBR 레이저 다이오드의 기본 특성을 파악하기 위해 능동 영역에 인가된 전류가 60, 100, 200 mA 인 경우에, 상위 SGDBR 영역에 인가되는 튜닝 전류를 변화시키며 시뮬레이션한 결과를 그림 3에 보였다. SGDBR이 동작하기 위한 임계 전류는 약 60 mA 근처임을 알 수 있고, 100 mA 이상의 전류를 흘리면 1 mW 이상의 광 파워를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

상단 SGDBR 영역의 전류를 조절하며 발진 스펙트럼과 튜닝 커브를 살펴보기 위하여, SGDBR 영역에 주입되는 전류에 따른 굴절률의 변화를 계산하였다. 외부에서 인가되는 전

Table 1. Parameters of a U-shaped SGDBR laser diode

Upper SGDBR section length	300 μm
Lower SGDBR section length	550 μm
Active section length	830 μm
Phase section length	60 μm
Upper SGDBR sampling period	62 μm
Lower SGDBR sampling period	68 μm
Upper SGDBR burst length	6 μm
Lower SGDBR burst length	4 μm
Spontaneous recombination coefficient, B	10^{-10} cm^3s^{-1}
Auger recombination coefficient, C	1.3×10^{-28} cm^6s^{-1}
Transparent carrier density, N_0	1.5×10^{18} cm^{-3}
Effective refractive index without current injection, $n_{eff},0$	3.2
Effective group refractive index, n_g	3.7
Active layer thickness, d_{act}	0.12 μm
Core thickness of SGDBR section, d_{ref}	0.23 μm
Spontaneous coupling factor, β	0.5×10^{-4}
Waveguide loss	Active section 30 cm^{-1} Phase section 5 cm^{-1} SGDBR section 5 cm^{-1}
Linewidth enhancement factor, α_m	3
Nonlinear gain compression coefficient, ε	10^{-17} cm^3

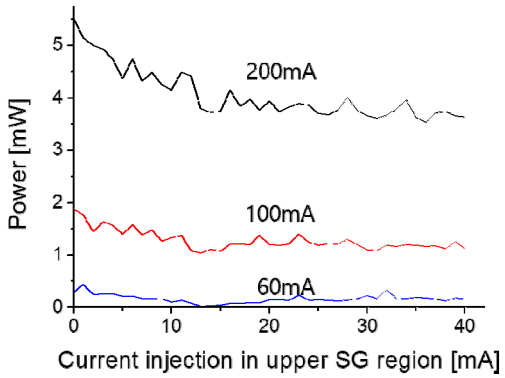

Fig. 3. Laser diode output power versus injection current into the upper sampled grating section for three different currents into the active section.

류에 따른 굴절률의 변화는 식 (7)의 율 방정식에 의해 도파로 내의 캐리어 밀도를 구하였고 이러한 캐리어 밀도의 변화는 참고논문[19]에 제시된 InP의 캐리어 밀도의 변화에 대한 굴절률의 변화 계수 값을 이용하여 굴절률의 변화로 환산 하였다. 그림 4에 율 방정식으로 구한 도파로 내의 캐리어 밀도의 변화를 보였다. 여기서 도파로의 두께와 길이는 각각 1 μm와 500 μm이다. 나머지 파리미터는 표 1의 값을 참고 하였다. 그림 4(a)는 도파로의 두께가 0.2 μm 일 때 인가되는 전류에 따른 캐리어 밀도의 시간적인 변화이다. 시간이 약 3.5 ns 이상 지나면 캐리어 밀도는 정상상태로 유지됨을 볼 수

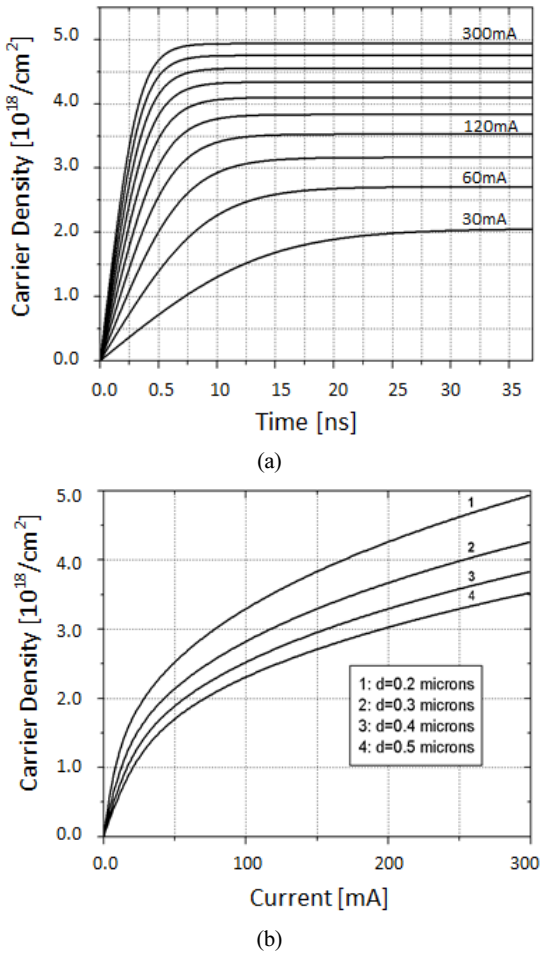

Fig. 4. (a) Carrier density time response for various step injection currents and (b) Steady state carrier density versus injection current for various active layer thicknesses.

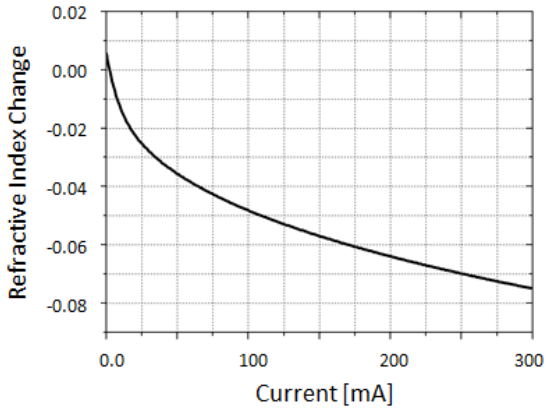

Fig. 5. Refractive index change versus injection current.

있다. 그림 4(b)는 도파로의 두께가 0.2 μm - 0.5 μm로 변할 때 인가되는 전류에 따른 캐리어 밀도의 변화를 나타낸 그림이다. 캐리어 밀도의 변화에 따른 굴절률의 변화 dn/dN은 -1.63×10^{-20} cm^3로 참고논문의 값을 참고하였다[19]. 튜닝 전류 변화에 대한 굴절률 변화를 계산한 결과를 그림 5에 보였다.

능동 영역에 200 mA 전류를 주입하고 상단 SGDBR 영역의 전류를 0 mA에서 40 mA 까지 조절하며 발진 스펙트럼과 튜닝 커브를 살펴보았다. 그림 6(a)와 6(b)를 통하여, 파장 가변 범위는 1526.25 nm에서 부터 1569.20 nm 까지 약 43 nm 의 파장 가변 범위를 가지며, 발진 파장 간 간격은 약 6 nm 정도의 간격을 나타내어 식 (1)을 이용한 계산 결과와 동일함을 확인하였다. 이 시뮬레이션 결과는 격자의 결합효율이 200 cm^{-1}인 경우에 대한 것이며, 결합 효율이 100 cm^{-1} 또는 300 cm^{-1}인 경우에도 출력 광 파워의 변화 외에는 거의 유사한 튜닝 결과를 얻을 수 있었다.

전반사 미러 영역에서의 손실에 따른 U형 SGDBR 레이저 다이오드의 성능 변화를 확인하기 위하여, 미러 영역의 손실 값을 1 dB에서 6 dB까지 변화시키며 나타난 상단 SGDBR 영역에서의 스펙트럼을 계산하여 그림 6에 도시하였다. 이 때, 능동 영역에는 200 mA를 주입하고 상단 SGDBR 영역의 전류를 0 mA에서 40 mA 까지 조절하였다. 그림 7(a)부터

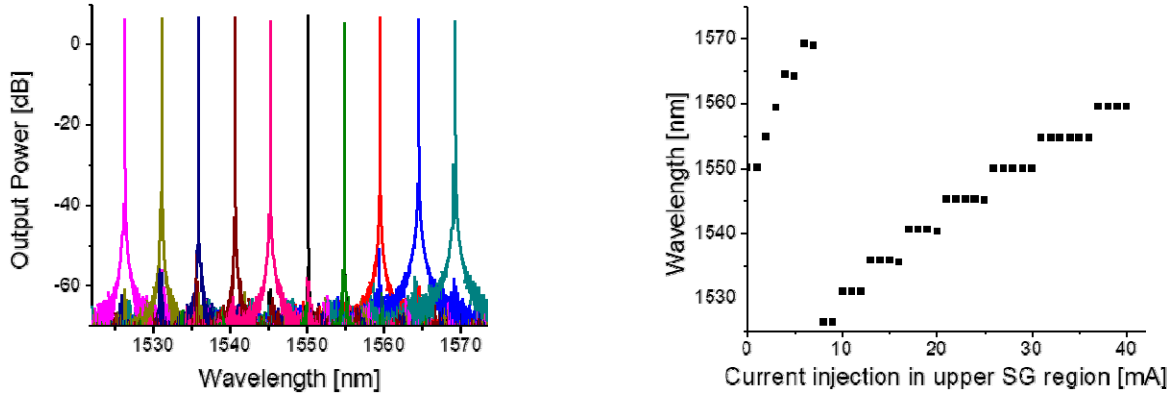

Fig. 6. (a) Lasing spectra and (b) tuning curve of a U-shaped SGDBR laser diode.

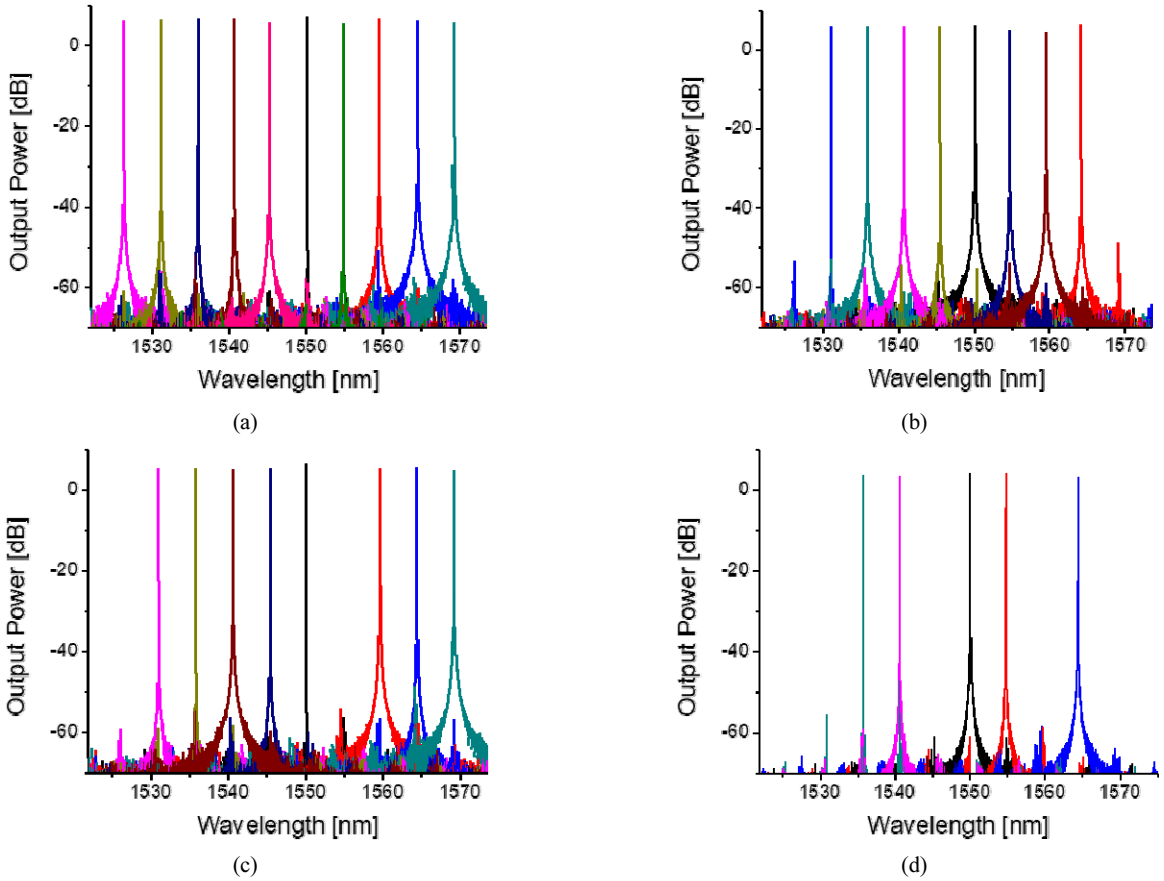

Fig. 7. Spectra of a U-shaped SGDBR laser diode whose TIR mirror loss is (a) 1 dB, (b) 2 dB, (c) 3 dB, and (d) 6 dB.

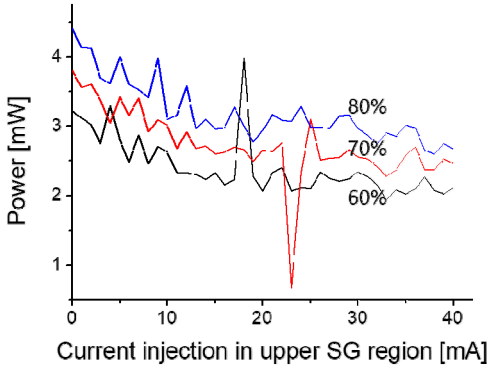

Fig. 8. Laser diode output power versus injection current into the upper sampled grating section for three different coupling efficiencies through butt coupling between the active and passive sections. The injection current into the active section is 200 mA.

그림 7(d) 까지 미러 영역의 손실이 1 dB에서 부터 2 dB, 3 dB, 6 dB로 증가함에 따라 점차적으로 파워가 감소하였으며, 미러 영역의 손실이 1 dB일 때 발진 채널의 수가 10개였으나 미러 영역의 손실에 따라 점차적으로 감소하여 손실이 6 dB 감소 시 발진 채널의 수가 5개로 감소한 것을 확인할 수 있었다. 구체적으로, 미러 영역의 손실이 3 dB일 때 1555 nm 파장 채널에서 발진이 제대로 이루어지지 않았고, 미러 영역의 손실이 6 dB로 증가하게 되면 1525 nm, 1530 nm, 1545 nm, 1560 nm, 1570 nm의 여러 파장 채널에서 발진이 이루어지지 않은 것을 확인하였다. 이로써 U형 SGDBR 레이저 다이오드 설계 시 미러 영역의 손실은 약 2 dB 이하가 되도록 세심한 설계와 제작 과정이 필요하다는 것을 알 수 있다.

U형 SGDBR 레이저 다이오드의 능동 영역과 수동 영역 간 결합 효율의 변화에 따른 출력 광파워 변화에 관하여 살펴 보았다. 능동 영역에는 전류 200 mA를 주입하고 추출 격자 영역의 전류를 0 mA에서 40 mA 까지 조절하였으며, 굴절률 차이는 0.075로 하였다. 결합 효율을 60%에서 80%까지 변화시켜가며 시뮬레이션 한 결과를 그림 8에 보였으며, 결합 효율이 10%씩 감소함에 따라 출력 광파워가 약 0.7 mW씩 감소함을 확인하였다.

능동 영역과 수동 영역 butt 결합 경계면에서의 굴절률 차이 증가에 따른 SGDBR 레이저 다이오드의 성능 열화를 확인하기 위하여 굴절률 차이가 0.05, 0.1, 0.2, 0.3인 경우의 튜닝 커브를 그림 8에 도시하였다. 굴절률 차이가 0.05인 경우(그림 9(a))에 비하여, 굴절률 차이가 0.2, 0.3 경우(그림 9(c), 9(d))로 변화한 경우, 3개 정도의 파장 채널에서 발진이 이루어지지 않은 것을 확인하였다. 굴절률 차이가 0.1인 경우는 (그림 9(b)) 한 개의 파장 채널(1575 nm)에서 발진이 이루어지지 않았다. 이를 통하여, 능동 영역과 수동 영역의 굴절률 차이가 0.1 이하가 되도록 웨이퍼 에피 구조를 설계해야 함을 알 수 있다. 즉, 그림 2의 예시 설계에서, 수동 도파로 영역의 조성을 1.4-1.45 Q 정도가 되도록 재성장한다면, 굴절률이 약 3.5 정도가 되어 굴절률 차이를 0.1 보다 작게 할 수 있을 것으로 사료된다.

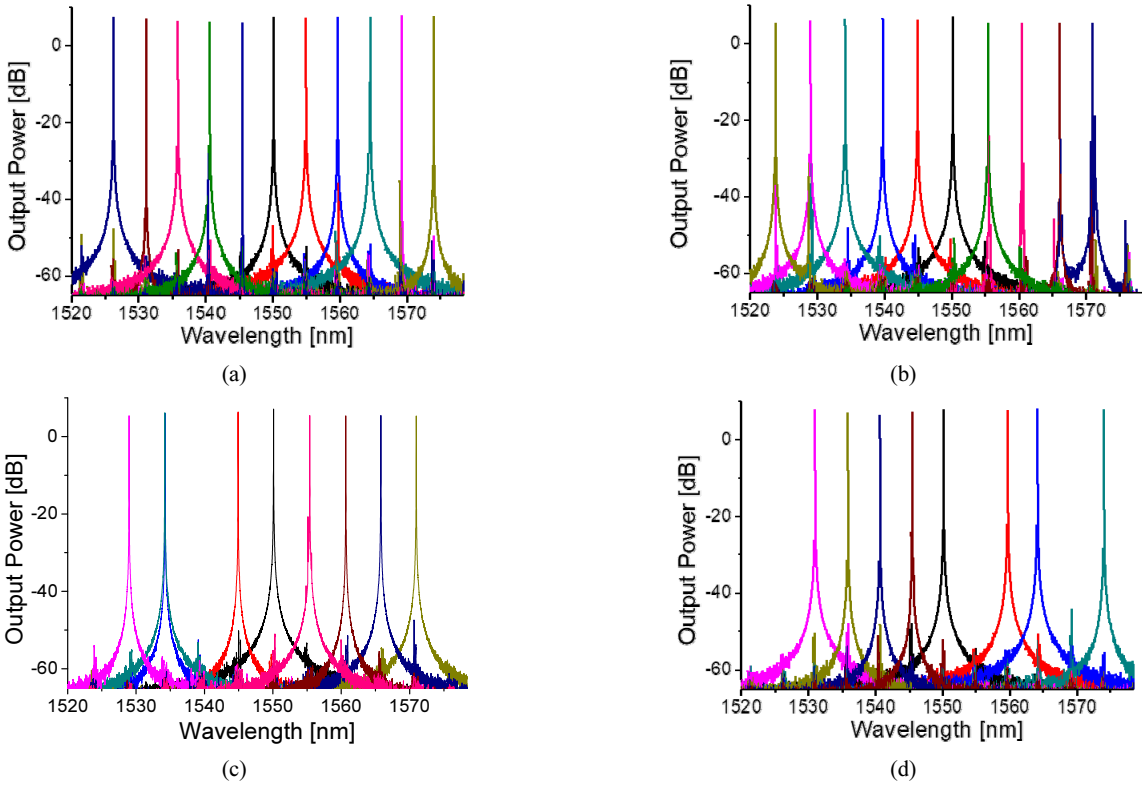

Fig. 9. Spectra of a U-shaped SGDBR laser diode for the refractive index differences of (a) 0.05, (b) 0.1, (c) 0.2, and (d) 0.3 at butt coupling interface between the active and passive sections.

V. 결 론

본 논문에서는 광대역 파장 가변 U형 SGDBR 레이저 다이오드를 설계하고, 그 성능을 이론적으로 살펴보았다. 시간 영역 시뮬레이션을 통해 레이저 다이오드의 특성을 해석하였으며, TIR 미러 영역의 손실, 능동 영역과 수동 영역 butt 결합 경계면에서의 결합 효율 및 굴절률 차이에 따른 레이저 다이오드의 출력 특성을 확인하였다.

시뮬레이션 결과, 설계한 U형 SGDBR 레이저 다이오드는 상단의 SGDBR 전류를 조절하여 튜닝 하는 경우, 약 6 nm의 파장 채널 간격으로 가변되며 파장 가변 범위는 약 1525 nm 에서부터 1570 nm 임을 확인하였다. TIR 미러 영역의 손실은 2 dB 보다 작아야 레이저 다이오드 소자로서 전체 파장 가변 범위에서 동작이 가능함을 확인하였다. 능동 영역과 수동 영역 사이 butt 경계에서의 결합 효율이 80%에서 10% 씩 감소함에 따라 출력 파워가 약 0.7 mW씩 감소함을 확인하였다. 능동 영역과 수동 영역 사이 butt 결합 경계에서의 굴절률 차이가 커짐에 따라 출력 가능한 파장 채널의 개수가 감소함을 확인하였고, 굴절률 차이가 0.1 이하가 되어야 전체 파장 가변 범위에서 모든 파장 채널들의 발진이 이루어짐을 알 수 있었다.

이러한 결과들을 통해 TIR 미러 및 butt 결합 경계 등을 적절히 설계 및 공정을 진행하여 얻어지는 U형 SGDBR 레이저 다이오드는 기존 SGDBR 레이저 다이오드보다 공간 활용 면에서 우수한 특성을 지니기 때문에, 차후 QPSK 코히어런트 트랜시버 등 집적도가 높은 여러 복합 광통신 소자를 제작하는 데 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2015년 한국산업기술진흥원 R&BD 프로그램 ((주)오이솔루션 주관) 지원 및 2016년도 광운대학교 교내학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

References

1. M. Veeraraghavan, R. Karri, T. Moors, M. Karol, and R. Grobler, “Architectures and protocols that enable new applications on optical networks,” IEEE Commun. Mag. **39**, 118-127 (2001).
2. J. Buus and E. J. Murphy, “Tunable lasers in optical networks,” J. Lightwave Technol. **24**, 5-11 (2006).
3. D. T. Neilson, “Photonics for switching and routing,” IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron. **12**, 669-678 (2006).
4. P. J. Williams, D. J. Robbins, F. O. Robson, and N. D. Whitbread, “High power and wide quasi-continuous tuning, surface ridge SG-DBR lasers,” in *Proc. Eur. Conf. Opt. Commun.* (Munich, Germany, 2000).
5. B. Mason, G. A. Fish, S. Denbaars, and L. A. Coldren, “Widely tunable sampled grating DBR laser with integrated electro-absorption modulator,” IEEE Photon. Technol. Lett. **11**, 638-640 (1999).
6. F. Delorme, G. Terol, H. de Baillencourt, S. Grosmaire, and P. Devoldere, “Long-term wavelength stability of 1.55-μm tunable distributed Bragg reflector lasers,” IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron. **5**, 480-486 (1999).
7. L. A. Coldren, “Monolithic tunable diode lasers,” IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron. **5**, 988-999 (2000).
8. Y. Tohmori, Y. Yoshikuni, H. Ishii, F. Kano, T. Tamamura, Y. Kondo, and M. Yamamoto, “Broad-range wavelength-tunable superstructure grating (SSG) DBR lasers,” IEEE J. Quantum Electron. **29**, 1817-1823 (1993).
9. M. Oberg, S. Nilsson, K. Streubel, J. Wallin, L. Backbom, and T. Klinga, “74 nm wavelength tuning range of an InGaAsP/InP vertical grating assisted codirectional coupler laser with rear sampled grating reflector,” IEEE Photon. Technol. Lett. **5**, 735-737 (1993).
10. G. Morthier, B. Moeyersoon, and R. Baets, “A λ/4-shifted sampled or superstructure grating widely tunable twin-guide laser,” IEEE Photon. Technol. Lett. **13**, 1052-1054 (2001).
11. F. Le Gall, S. Mottet, N. Devoldere, and J. Landreau, “External cavity laser for DWDM access network,” 24th Eur. Conf. Opt. Commun. **1**, 285-286 (1998).
12. B. Mason, J. Barton, G. A. Fish, L. A. Coldren, and S. P. DenBaars, “Design of sampled grating DBR lasers with integrated semiconductor optical amplifiers,” IEEE Photon. Technol. Lett. **12**, 762-764 (2000).
13. B. Mason, G. A. Fish, J. Barton, L. A. Coldren, and S. P. DenBaars, “Characteristics of sampled grating DBR lasers with integrated semiconductor optical amplifiers,” Opt. Fiber Commun. Conf. 2000 **1**, 193-195 (2000).
14. Y. A. Akulova, G. A. Fish, P.-C. Koh, C. L. Schow, P. Kozodoy, A. P. Dahl, S. Nakagawa, M. C. Larson, M. P. Mack, T. A. Strand, C. W. Coldren, E. Hegblom, S. K. Penniman, T. Wipiejewski, and L. A. Coldren, “Widely tunable electroabsorption-modulated sampled-grating DBR laser transmitter,” IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron. **8**, 1349-1357 (2002).
15. D. J. Blumenthal, “Tunable U-laser transmitter with integrated Mach-Zehnder modulator,” U.S. Pat. Appl. No 14/146,717 (2014).
16. V. Jayaraman, Z.-M. Chuang, and L. A. Coldren, “Theory, design, and performance of extended tuning range semiconductor lasers with sampled gratings,” IEEE J. Quantum Electron. **29**, 1824-1834 (1993).
17. L. M. Zhang and J. E. Carroll, “Semiconductor 1.55 μlaser source with gigabit/second integrated electroabsorptive modulator,” IEEE J. Quantum Electron. **30**, 2573-2577 (1994).
18. B. S. Kim, J. K. Kim, Y. Chung, and S. H. Kim, “Time-domain large-signal analysis of widely tunable DBR laser diodes with periodically sampled and chirped gratings,” IEEE Photon. Technol. Lett. **10**, 39-41 (1998).
19. J.-P. Weber, “Optimization of the carrier-induced effective index change in InGaAsP waveguide - Application to tunable Bragg filters,” IEEE Photon. Technol. Lett. **30**, 1801-1816 (1994).