

## 추출격자 분포 브래그 반사기가 집적된 광대역 파장가변 추출격자 분포 궤환 레이저 다이오드

김수현<sup>†</sup> · 정명철

광운대학교 전자통신공학과

⑧ 139-701 서울특별시 노원구 월계동 447-1 참빛관 712

(2004년 2월 3일 받음, 2004년 7월 19일 수정본 받음)

본 논문에서는 새로운 구조의 파장가변 레이저 다이오드를 제안하였다. 제안된 레이저 다이오드는 추출격자 분포궤환 레이저 다이오드와 추출격자 분포 브래그 반사기가 집적된 구조로 되어 있다. 제안된 레이저 다이오드는 특정한 구조에서 27 nm정도의 광대역 파장가변이 가능함을 수치해석을 통해 확인하였다. 또한 이득영역에서 생성된 광파를 다른 수동영역을 거치지 않고 직접 광섬유에 결합시킬 수 있는 구조로 광효율이 기존의 레이저 다이오드에 비해 우수함을 확인하였다.

주제어 : tunable laser, semiconductor laser, sampled grating, optoelectronics.

### I. 서 론

선폭이 작고 높은 파워를 가지는 여러 파장의 광원은 파장 분할 다중화 방식(Wavelength Division Multiplexing)의 광통신 시스템을 구성하는데 있어 전송특성 및 시스템의 전체성을 좌우 할 만큼 중요한 요소이다. 현재 개발되고 상용화된 WDM 광통신 시스템은 고정된 파장으로 발진하는 단일 모드 레이저 다이오드로 구성되어 있다. 이러한 구성은 각 파장별로 여러 종류의 레이저 다이오드가 필요하고 시스템의 유지, 보수에 있어서도 필요 이상의 레이저 다이오드가 필요하게 된다. 이에 반해 시스템의 광원을 파장가변 레이저 다이오드로 사용하게 되면, 시스템을 구성하는데 있어서 레이저 다이오드의 종류를 크게 줄일 수 있고, 백업용 광원 광원의 수를 줄일 수 있다. 또한 네트워크 계획을 용이하게 하고, 동적으로 파장을 제공할 수 있을 뿐만 아니라 네트워크 제어 소프트웨어를 단순화 할 수 있다. 이러한 이유로 파장가변 레이저 다이오드는 DWDM 기반의 장거리 광통신 시스템 및 메트로 광통신 시스템 뿐만 아니라 현재 개발 중인 WDM-PON 기반의 가입자 광통신 시스템에 이르기까지 많은 광통신 시스템을 구축하기 위한 필수적인 소자로 인식되고 있다.<sup>[1-3]</sup>

현재까지 여러 구조의 파장가변 레이저 다이오드가 제안되고 개발되어져 왔다. 특히 통신용 파장가변 레이저 다이오드는 안정적인 동작과 패키지 비용의 절감을 위해 집적광원 형태로 개발되어져 왔다<sup>[4]</sup>. 이러한 집적광원 형태의 대표적인 파장가변 레이저 다이오드는 SG-DBR(Sampled Grating Distributed Bragg Reflector) 레이저 다이오드, SSG-DBR(Super-Structure Grating DBR) 레이저 다이오드, TTG(Tunable Twin-Guide) 레이저 다이오드, GCSR(Grating assisted

Codirectional coupler with rear Sampled grating Reflector) 레이저 다이오드 등이 있다.<sup>[5-8]</sup>

본 논문에서는 새로운 구조의 파장가변 레이저 다이오드를 제안하였다. 제안한 레이저 다이오드는 추출격자(Sampled Grating)의 반사 스펙트럼 특성을 이용하였다. 제안된 레이저 다이오드 구조는 이득영역에 추출격자가 형성된 추출격자 분포 궤환(Sampled Grating Distributed Feedback: SG-DFB) 레이저 다이오드에 추출격자 분포 브래그 반사기(SG-DBR)를 집적시킨 구조로 구성된다. 또한 SG-DFB 레이저 다이오드에 형성된 추출격자 사이에 수동 도파로 영역을 두어서 파장가변이 가능하게 된다. 이러한 레이저 다이오드는 이득영역에서 생성된 광파를 직접 광섬유에 결합할 수 있으므로, 파장 가변을 위해서 이득 영역 양단에 수동영역을 두는 SG-DBR 레이저 다이오드나 DBR 레이저 다이오드가 가지는 단점을 극복하고, 보다 효율적으로 동작할 것으로 예측된다. 이러한 결과를 연산자 분리 시영역 모델을 사용하여 확인하였다. 또한 이러한 구조는 기존의 레이저 다이오드의 구조에서 크게 벗어나지 않은 구조이기 때문에 기존의 공정장비로 제작이 가능할 것으로 예상되기 때문에 경제적으로도 많은 이점을 가질 수 있다. 본 논문의 구성은 2장에서 제안한 레이저 다이오드의 구조 및 동작원리에 대하여 기술하였고, 3장에서는 수치해석을 통하여 제안된 레이저 다이오드의 정/동적 특성에 대한 결과를 기술하였고, 4장에서 연구결과를 정리하였다.

### II. 제안된 레이저 다이오드의 구조 및 동작원리

본 논문에서 제안한 레이저 다이오드의 구조를 그림 1에 보였다. 제안한 레이저 다이오드는 SG-DFB 레이저 다이오드에 SG-DBR이 집적된 구조로 되어 있다. SG-DFB 레이저 다이오드 영역에는 파장가변을 위하여 추출격자 영역 사이

<sup>†</sup>E-mail: suhyun@opto.kwangwoon.ac.kr

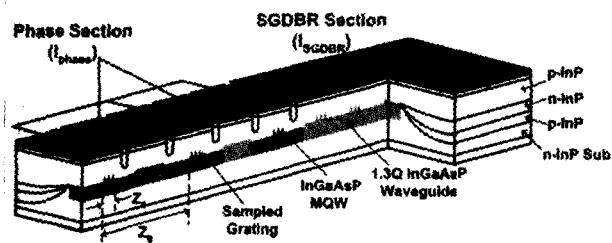


그림 1. 논문에서 제안한 레이저 다이오드에 개략도.

에 수동 도파로 형태의 위상 제어 영역으로 구성되어 진다. 레이저 다이오드의 양 단면에는 안정적인 동작을 위해 무반사 코팅(Anti-Reflection Coating)을 하였고, SG-DFB 레이저 다이오드 영역과 SG-DBR 영역에서 추출격자의 주기는 파장 가변을 위해 서로 다르게 구성한다. 이러한 구조는 기존의 제작 가능한 구조로 구성되어 있으므로, 기존의 공정에서 충분히 제작 가능할 것으로 예상된다.

SG-DFB 레이저 다이오드 영역에서 생성된 광파는 단면이 무반사 코팅되어 있기 때문에 추출격자에 의해 생성되는 반사 스펙트럼의 피크에서 공진할 수 있다. 그러므로 SG-DFB 레이저 다이오드에 생성되는 광파는 다중 모드로 발진한다. 여기서 반사 스펙트럼은 격자의 주기와 도파로의 굴절률에 의해 결정되는 브래그 파장을 중심으로 일정한 파장간격마다 반사 피크를 가진다.<sup>[9]</sup> 이때의 각 반사 피크간의 파장간격은 식(1)에 의해서 결정되므로, 각 모드간의 간격도 식(1)에 의해서 구할 수 있다.

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_0}{2n_g Z_0} \quad (1)$$

여기서  $\lambda_0$ 는 중심파장이고,  $n_g$ 와  $Z_0$ 는 군굴절률(Group Index)과 추출격자 주기이다. 또한 SG-DBR의 반사 스펙트럼 피크간의 간격도 마찬가지 방법으로 구할 수 있다. 일반적으로 사진전사 방법에 의해서 추출격자의 주기는 쉽게 조절할 수 있다. 제안한 레이저 다이오드의 두 영역에서의 추출격자 주기는 서로 다르게 구성하므로 SG-DFB 레이저 다이오드 영역에서 생성되는 모드와 SG-DBR 영역에서의 반사 피크간의 파장간격 차이는 서로 다르게 된다. SG-DBR 영역에 전류를 인가시키면 플라즈마 효과(Plasma Effect)<sup>[12]</sup>에 의해서 영역의 굴절률이 작아지며, 이러한 굴절률의 변화에 따라 반사 피크의 파장을 변화 시킬 수 있다. SG-DFB 레이저 다이오드 영역에서 생성되는 모드들은 추출격자 사이에 형성된 위상제어 영역의 굴절률을 변화시켜 모드들의 파장을 변화 시킬 수 있다. 이러한 굴절률의 변화에 따른 모드의 파장변화는 식(2)를 통해 구할 수 있다.

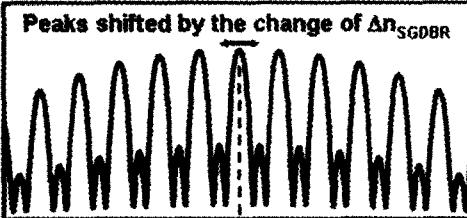
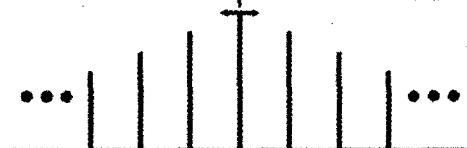
$$2 \cdot \frac{2\pi}{\lambda} [(\Gamma \Delta n + n_g) L + n_g (Z_0 - L)] = 2\pi \cdot m \quad (2)$$

여기서  $\Gamma$ 는 구속인자(Confinement Factor)이고  $L$ 은 위상

제어 영역의 길이이고,  $m$ 은 정수이다. SG-DFB의 모드들은 식(2)의 위상정합 조건을 만족하는 파장의 광파이다. 식(2)에서 굴절률이 변화하게 되면 위상정합 조건을 만족하는 광파의 파장이 변화하게 된다. 즉 모드들의 중심 파장이 이동하게 되므로 위상제어 영역의 굴절률의 변화를 통해 모드들의 파장을 변화 시킬 수 있다.

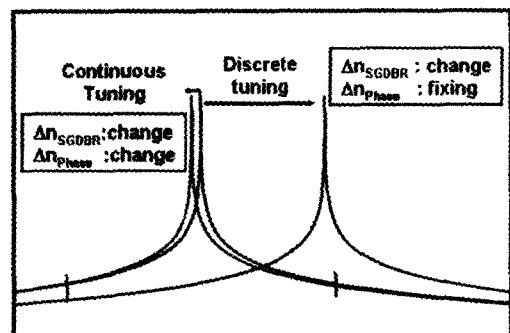
제안한 레이저 다이오드의 파장가변 원리를 그림 2에 정리해 놓았다. 그림 2에서 보는 바와 같이 제안한 레이저 다이오드는 SG-DFB 영역에서 생성되는 각각의 모드들 중 SG-DBR 영역에서의 반사 피크와 일치하는 파장의 모드만이 레이저 다이오드 내에서 지속적으로 공진할 수 있으므로 이 모드의 파장만이 발진하게 된다. 또한 SG-DBR 영역의 굴절률 변화에 의해 반사 피크의 파장이 변화하면 일치되는 모드가 변화하게 되므로 발진파장도 변화하게 된다. 즉 SG-DBR 영역의 굴절률 변화를 통해 레이저 다이오드는 일정한 파장간격으로 불연속적인 파장가변이 가능하게 된다. 여기서 발진 파장의 간격은 SG-DFB 영역의 모드 간격과 같다. SG-DFB

### Reflectivity spectrum in the SGDBR

Modes shifted by the change of  $\Delta n_{\text{SGDBR}}$ 

Longitudinal modes in the SGDFB

(a) SG-DFB 레이저 다이오드 영역의 모드와 SG-DBR 영역의 반사 스펙트럼



Lasing spectrum

(b) 연속/불연속 파장가변

그림 2. 제안한 레이저 다이오드의 동작원리.

내에 생성되는 모드들은 식(2)를 통해 위상제어 영역의 굴절률 변화를 통해 이동 가능함을 알 수 있다. 이러한 모드의 변화와 반사 피크의 변화를 적절히 하게 변화시킴으로써 레이저 다이오드는 연속적인 파장가변이 가능하게 된다.

제안한 레이저 다이오드는 이득영역의 광파를 다른 수동영역을 거치지 않고 직접 광섬유에 결합할 수 있는 구조로 구성되어 있다. 이로 인해 수동 도파로를 지나면서 발생하는 전계흡수 손실에 대한 영향이 작으며, 파장가변을 위해 수동 영역에 인가되는 전류에 의해 발생하는 추가적인 흡수손실(Free-Carrier Absorption Loss)<sup>[10]</sup>에 대한 영향이 작다. 즉 높은 광 파워로 발진가능하며, 파장가변 시 발진되는 각 파장의 임계전류 값 변화에 대한 영향을 작게 할 수 있으므로 각각의 발진파장에 대한 출력 광 파워의 변화가 일정하게 유지할 수 있다.

### III. 수치해석 결과

제안한 레이저 다이오드의 동작 특성들을 예측하기 위해서 연산자 분리 시영역 모델을 사용하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석에 사용된 모델은 DBR/DFB 레이저 다이오드에 매우 효율적인 모델로 알려져 있다.<sup>[11]</sup> 수치해석에 고려한 레이저 다이오드의 구조를 그림 3에 나타내었다. 레이저 다이오드는 607.5 μm의 SG-DFB 레이저 다이오드 영역과 578 μm의 SG-DBR 영역으로 구성되어 있다. SG-DFB와 SG-DBR에 형성된 추출격자의 주기는 각각 202.5 μm와 192 μm으로 고려하였다. SG-DFB 영역에 형성된 위상제어 영역은 추출격자 사이에 위치하며, 각각의 길이는 75 μm이다. 레이저 다이오드의 양 단면은 무반사 코팅이 되어있고 도파로의 두께는 이득영역과 수동영역에서 각각 0.12 μm, 0.23 μm이고 도파로의 폭은 1.5 μm로 고려하였다. 나머지 레이저 다이오드의 파라미터는 표 1에 정리해 놓았다.

그림 4는 SG-DFB 레이저 다이오드 영역에 200 mA의 전류를 인가시켰을 때 SG-DBR 영역의 전류 변화에 따른 발진

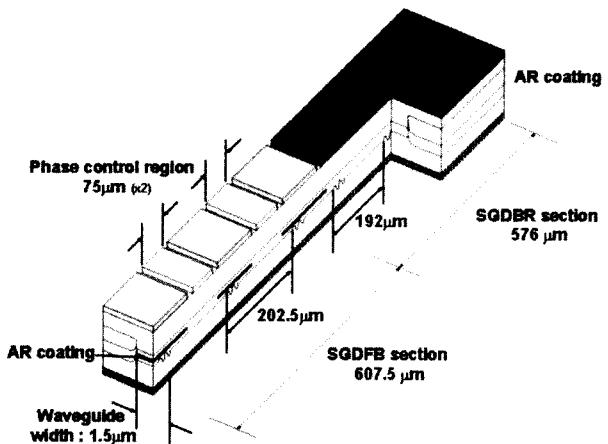


그림 3. 수치해석에서 고려한 레이저 다이오드의 구조.

파장의 변화와 그때의 출력 광 파워의 변화에 대한 결과이다. 캐리어 밀도의 변화는 굴절률의 변화를 초래한다는 사실이 잘 알려져 있다.<sup>[12]</sup> 본 시뮬레이션에서는 캐리어 밀도 변화에 의한 굴절률의 변화를 고려하였다. 그러나 인가되는 전류에 의한 흡수계수의 변화는 고려하지 않았고 이러한 흡수계수의 변화에 대한 영향은 나중에 언급하였다. 그림에서의 결과와 같이 SG-DBR 영역의 전류 변화에 따라 제안된 레이저 다이오드는 27 nm 정도의 파장가변 범위를 가짐을 볼 수 있다. 여기서 각 발진파장 간의 간격은 식(1)을 통해 구할 수 있는 SG-DFB 레이저 다이오드의 모드간의 간격과 같음을 확인할 수 있다. 이러한 추출격자의 주기를 다르게 하여 각 영역의 반사 피크의 Vernier Effect를 이용한 파장가변 레이저 다이오드의 파장가변 범위( $\Delta\nu_{rep}$ )는 식(3)을 통해서 구할 수 있다.

$$\Delta\nu_{rep} = \frac{c}{2n_g Z_0} \frac{Z_0'}{Z_0 - Z_0'} \quad (3)$$

여기서  $Z_0$ 와  $Z_0'$ 은 SG-DFB 영역과 SG-DBR 영역의 추출

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	$N_0$	$1.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
Linewidth Enhancement Factor	$\alpha_m$	3
Waveguide Loss in Active Section	$\alpha$	$30 \text{ cm}^{-1}$
Waveguide Loss in Passive Section	$\alpha_e$	$5 \text{ cm}^{-1}$
Effective Group Refractive Index	$n_{eff}$	3.7
Waveguide Confinement Factor	$\Gamma$	Active: 0.17 Passive: 0.51
Coupling Coefficient	$x$	$200 \text{ cm}^{-1}$
Differential Gain	$g_n$	$4.0 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$

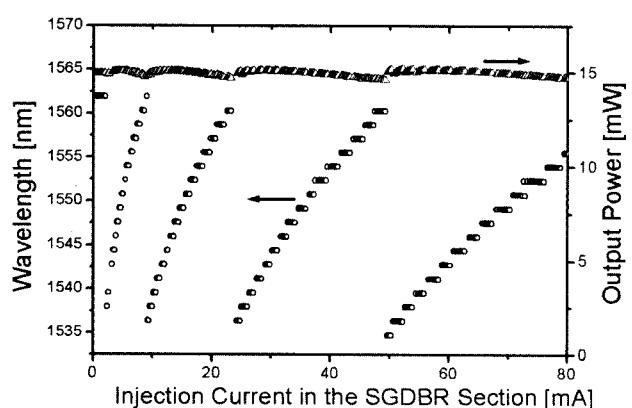


그림 4. SG-DBR 영역에 전류를 인가 시켰을 경우 발진파장의 변화와 출력 광 파워의 변화.

격자 주기이다. 제안한 레이저 다이오드의 파장가변 범위와 식 (3)을 통해 예상한 파장가변 범위가 유사함을 이러한 결과를 통해 확인할 수 있었다. 또한 출력 광 파워는 모든 파장가변 영역에서 10 mW 이상의 높은 파워로 발진하고 있음을 확인할 수 있었다.

그림 5는 발진파장의 출력 스펙트럼을 중첩 시킨 결과이다. 각각의 발진파장은 35 dB 이상의 부모드 억제율(Side Mode Suppression Ratio : SMSR)을 유지하면서 파장가변이 가능함을 볼 수 있다. 이러한 결과로 제안한 레이저 다이오드는 WDM 광 통신 시스템의 광원으로 사용할 수 있음을 예상할 수 있다.

그림 6은 SG-DFB 영역에 형성된 위상제어 영역의 전류와 SG-DFB 영역의 전류를 적절히 변화시켜 제안한 레이저 다이오드를 연속적인 파장가변을 시켰을 경우의 결과이다. 그림 5와 6의 결과를 통해 제안한 레이저 다이오드는 연속적/불연속적인 광대역 파장가변이 가능함을 수치해석을 통해 확인할 수 있었다.

파장가변 시 선폭의 변화를 계산한 결과를 그림 7에 정리하였다. 보다 정확한 Fast Fourier Transform 결과를 얻기 위

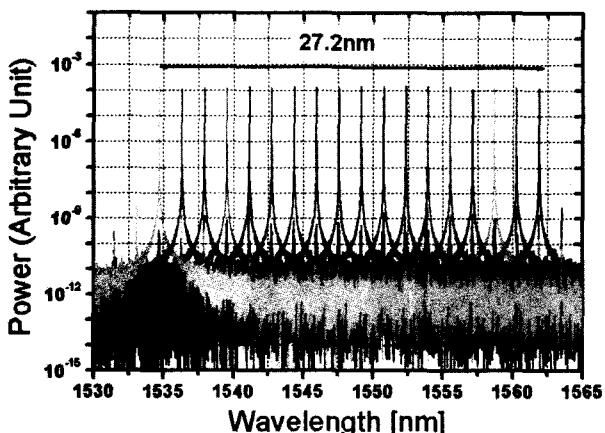


그림 5. 불연속 파장가변 스펙트럼.

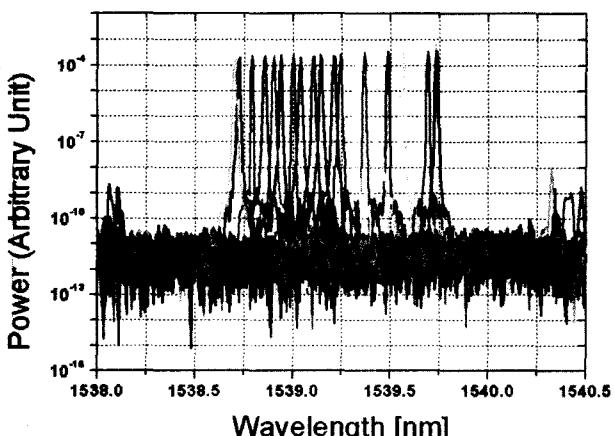


그림 6. 연속적 파장가변 스펙트럼.

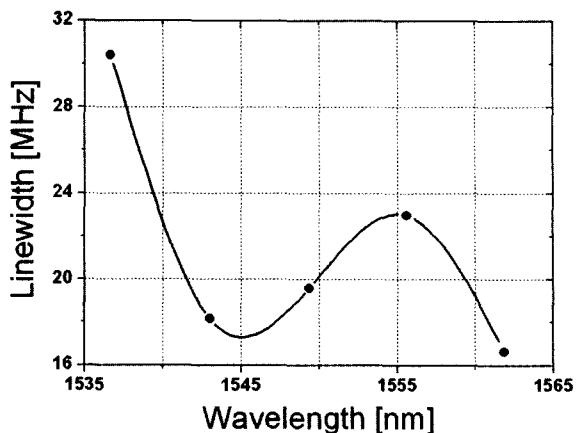
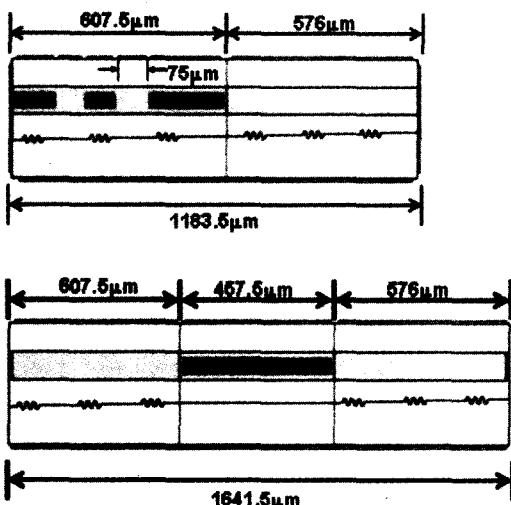
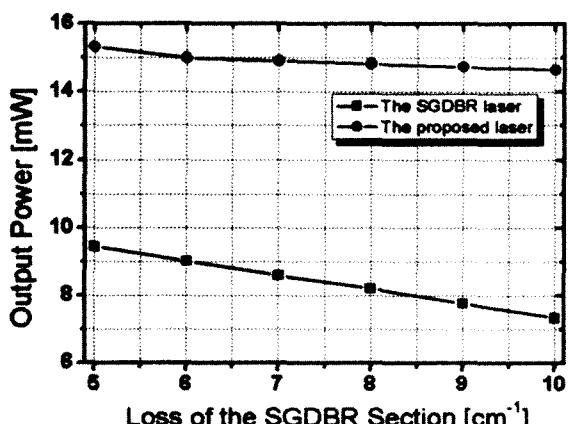


그림 7. 발진파장의 변화에 따른 선폭의 변화.



(a) 제안한 레이저 다이오드와 SG-DBR 레이저 다이오드 구조



(b) SG-DBR 영역의 흡수 손실의 변화에 따른 출력 광파워의 변화

그림 8. 제안한 레이저 다이오드와 SG-DBR 레이저 다이오드의 광 효율 비교

해서 데이터의 개수를  $2^{21}$ 개로 하여 주파수간의 간격이 약 25 MHz가 되도록 하였다. 발진파장에 따라 선폭이 약 16 MHz ~ 30 MHz 정도 변화함을 볼 수 있다. 선폭은 출력 광 파워 및 SG-DBR 영역에서의 반사계수의 위상에 의해서 결정된다.<sup>[13]</sup> 파장가변 시 변화하는 출력 파워와 그때 SG-DBR의 반사계수의 위상의 변화에 따라 제안된 레이저 다이오드는 선폭이 약 14 MHz 정도 변화함을 확인할 수 있었다.

제안한 레이저 다이오드는 이득영역에 생성된 광파를 직접 광섬유에 결합시킬 수 있는 구조로, SG-DBR 레이저 다이오드나 SSG-DBR(Super-Structure Grating DBR) 레이저 다이오드와 같이 이득영역 양단에 격자 등이 형성된 수동영역을 두어 파장가변이 가능한 레이저 다이오드에 비해 출력 광 효율이 우수하다. 그림 8은 추출격자 구조가 같은 SG-DBR 레이저 다이오드와 논문에서 제안한 레이저 다이오드의 수동 영역의 전계흡수 손실의 변화에 따른 출력 광 파워의 변화를 수치해석을 통해 비교한 결과이다. 그림 8(a)에 수치해석에 고려한 SG-DBR 레이저 다이오드와 제안한 레이저 다이오드의 구조를 나타내었다. SG-DBR 레이저 다이오드의 SG-DBR 영역의 구조와 제안한 레이저 다이오드는 같은 추출격자 주기로 구성되고 이득영역의 길이는 같다. 주입되는 전류 등의 나머지 레이저 다이오드의 파라미터는 같은 값으로 수치해석 하였다. 그림 8(b)에 이러한 구조의 두 레이저 다이오드에서 SG-DBR 영역의 전계흡수 손실 계수의 변화에 따른 출력 광 파워의 변화를 나타내었다. 전계흡수 손실 계수가  $5 \text{ cm}^{-1}$  일 경우 SG-DBR 레이저 다이오드에 비해 제안된 레이저 다이오드가 약 5 mW 이상 더 높은 파워로 발진함을 볼 수 있다. 이러한 결과를 통해 제안된 레이저 다이오드는 SG-DBR 레이저 다이오드에 비해 출력 광 효율이 우수함을 확인할 수 있다. 또한 흡수손실 계수가 커짐에 따라 제안한 레이저 다이오드는 비교적 일정한 광 파워를 유지함을 볼 수 있다. 이러한 결과를 통해 파장 가변을 위해 인가되는 전류에 의해서 발생하는 추가적인 전계흡수 손실에 대한 영향이 SG-DBR 레이저 다이오드에 비해 작음을 확인할 수 있다.

그림 9과 10은 레이저 다이오드의 동적 특성에 대한 결과이다. 그림 9는 레이저 다이오드에 5 GHz의 정현파를 직접 변조를 통해 인가시켰을 경우 그때 출력 광 파워의 시간에 따른 변화와 그때의 스펙트럼이다. 이러한 고속의 전류신호에도 레이저 다이오드는 수십 ps의 위상지연을 가지면서 잘 동작하고 있음을 볼 수 있다. 레이저 다이오드의 파장 특성도 이러한 전류 신호에 따라 부모드 억제율의 특성은 다소 저하되지만, 35 dB 이상을 유지하며 단일 모드로 발진하고 있음을 볼 수 있다. 그림 10은 SG-DBR 영역의 전류를 시간에 따라 변화 시켰을 경우 출력 광 파워와 그때의 스펙트럼의 변화에 대한 결과이다. SG-DBR 영역에 인가되는 전류는 1 ns 정도의 상승시간을 가지면서 변화하는데 이러한 변화에 레이저 다이오드는 잘 동작하고 있음을 수치해석을 통해 확인하였다. 이러한 결과를 통해 제안한 레이저 다이오드는 매우 빠른 속도로 동적 파장가변이 가능함을 확인할 수 있었고 이러한 레이저 다이오드는 고속의 파장 라우팅 시스템에서 중요한 소자로 사용 가능함을 확인하였다.

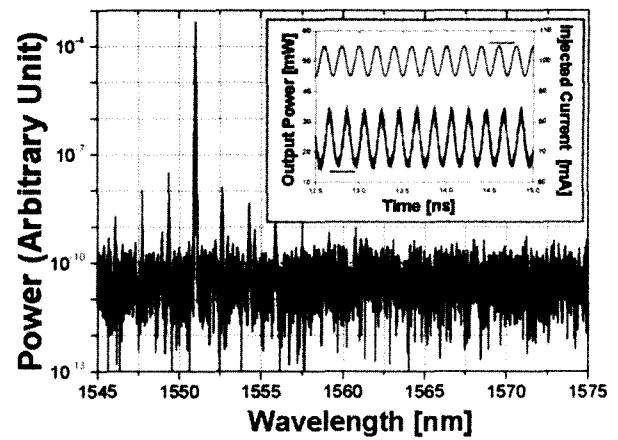


그림 9. 5 GHz의 직접 변조 신호 인가 시 시간에 따른 출력 광 파워의 변화와 스펙트럼.

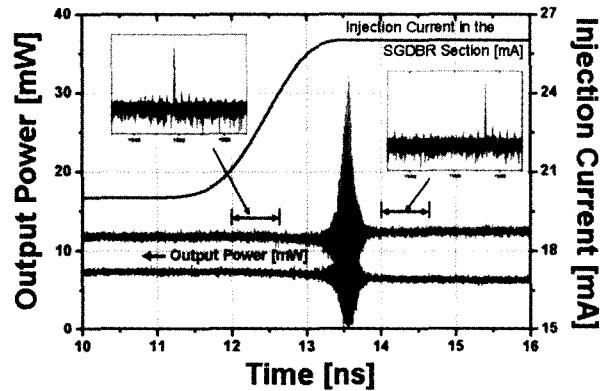


그림 10. SG-DBR 영역의 전류변화에 따른 발진파장의 변화.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 연산자 분리 시영역 모델을 이용하여 WDM 시스템을 구성하는데 있어서 가장 중요한 소자 중 하나인 파장가변 레이저 다이오드의 새로운 구조에 대해서 연구하였다. 기존의 레이저 다이오드와 다른 원리의 새로운 구조의 파장가변 레이저 다이오드를 제안하였고 수치해석을 통해 제안된 레이저 다이오드의 동작원리와 그 특성을 확인하였다. 제안된 레이저 다이오드의 구조는 SG-DFB 레이저 다이오드에 SG-DBR이 접적된 구조로 되어있다. SG-DFB 레이저 다이오드에 형성된 추출격자 사이에 수동 도파로 구조의 위상제어 영역이 형성된다. 제안된 레이저 다이오드는 SG-DFB 영역에서 생성된 모드와 SG-DBR 영역의 반사 스펙트럼의 피크와 일치하는 파장에서 발진하게 되고, SG-DBR 영역과 위상제어 영역의 굴절률의 변화에 따라 레이저 다이오드는 파장가변이 가능하게 된다. 이러한 구조는 제작에 있어서 기존의 SG-DBR과 같은 파장가변 레이저 다이오드와 유사한 방법으로 제작이 가능할 것으로 예상된다.

수치해석을 통해 제안한 레이저 다이오드의 특성을 살펴보았다. 수치해석 결과 약 27 nm의 파장가변이 가능함을 확인

할 수 있었다. 레이저 다이오드의 SG-DBR 영역과 위상제어 영역에 인가되는 바이어스 전류 조건에 따라 연속/불연속 파장가변이 가능함을 확인하였다. 발진파장의 3 dB 선폭은 수십 MHz 정도이고 발진파장의 변화에 따라 약 14 MHz 정도 변화하고 있음을 확인하였다. 출력 광 파워는 이득영역에서의 광파를 직접 광섬유에 결합 시킬 수 있는 구조로 출력 광 효율과 광 파워가 기존의 SG-DBR 레이저 다이오드에 비해 우수함을 수치해석을 통해 확인하였다. 또한 수 GHz의 직접 변조 시 발진파장의 변화 없이 단일 모드를 유지하고 있음을 확인할 수 있었고, SG-DBR 영역의 전류의 변화에도 빠르게 파장이 가변될 수 있음을 보였다.

### 감사의 글

이 논문은 2003년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음. (KRF-2003-041-D00440).

### 참고문헌

- [1] M. Veeraraghavan, R. Karri, T. Moors, M. Karol, R. Grobler, "Architectures and protocols that enable new applications on optical networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 39, no. 3, pp. 118-127, 2001.
- [2] B. Mason, S. L. Lee, M. E. Heimbuch, and L. A. Coldren, "Directly modulated sampled grating DBR lasers for long-haul WDM communications systems," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 9, no. 3, pp. 377-379, 1997.
- [3] 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," Proceedings of ECOC'2000, Munich, Germany, 2000.
- [4] L. A. Coldren, "Monolithic tunable diode lasers," *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 5, no. 6, pp. 988-999, 2000.
- [5] Beck Mason, Jonathon Barton, Greg A. Fish, Larry A. Coldren, and Steven P. DenBaars, "Design of sampled grating DBR lasers with integrated semiconductor optical amplifiers," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 12, no. 7, pp. 762-764, 2000.
- [6] 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 Journal of Quantum Electronics*, vol. 29, no. 6, pp. 1817-1823, 1993.
- [7] 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 Photonics Technology Letters*, vol. 5, no. 7, pp. 735-737, 1993.
- [8] Geert Morthier, Bart Moeyersoon, Roel Baets, "A 1/4-shifted sampled or superstructure grating widely tunable twin-guide laser," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 13, no. 10, pp. 1052-1054, 2001.
- [9] Vijaysekhar Jayaraman, Zuon-Min Chuang, and Larry A. Coldren, "Theory, design, and performance of extended tuning range semiconductor lasers with sampled gratings," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 29, no. 6, pp. 1824-1834, 1993.
- [10] P. Brosset, C. Labourie, L. Le Gouezigou, J. L. Lievin, J. Jacquet, F. Leblond, A. Olivier, D. Leclerc, "Experimental determination of carrier-induced differential loss in 2-section GaInAsP/InP laser waveguide", *IEE Electronics Letters*, vol. 25, no. 24, pp. 1623-1624, 1989.
- [11] B. S. Kim, Y. Chung, J. S. Lee, "An efficient split-step time-domain dynamic modeling of DFB/DBR laser diodes," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 36, no. 7, pp. 787-794, 2000.
- [12] Jean-Pierre Weber, "Optimization of the carrier-induced effective index change in InGaAsP waveguide-application to tunable Bragg filters", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 30, no. 8, pp. 1801-1816, 1994.
- [13] Yuji Kotaki, Horoshi Ishikawa, "Spectral characteristics of a three-section wavelength-tunable DBR Laser", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 26, no. 6, pp. 1340-1345, 1989.

### A widely tunable sampled-grating distributed feedback laser diode integrated with sampled-grating distributed bragg reflector

Suhyun Kim<sup>†</sup> and Youngchul Chung

*Department of Electronics and Communications Engineering, Kwangwoon University,  
447-1 Wolgye-Dong Nowon-Ku, Seoul 139-701, KOREA*

<sup>†</sup>E-mail: suhyun@opto.kwangwoon.ac.kr

(Received February 3, 2004, Revised manuscript July 19, 2004)

In this paper, we propose a new tunable laser diode structure. The laser diode consists of a sampled-grating distributed feedback laser diode monolithically integrated with a sampled-grating distributed-Bragg-Reflector. For a specific design, the possibility of continuous/discrete wavelength tuning over 27nm is confirmed by a numerical analysis using a split-step time domain model. Because the laser diode can be directly coupled with optical fiber without the intervention of the passive section, the laser diode exhibits higher output power than the conventional laser diode.

OCIS Codes : 230.3120, 230.0250, 140.3600.