

논문 2005-42SD-10-3

추출격자 분포 브래그 반사기가 집적된 광대역 파장가변 추출격자 분포 궤환 레이저 다이오드의 파장가변 특성해석

(Analysis of Tuning Characteristics of Widely Tunable Sampled Grating Distributed Feedback Laser diode integrated with Sampled Grating Distributed Reflector)

김수현*, 정영철*

(Suhyun Kim and Youngchul Chung)

요약

본 논문에서는 추출격자 분포 브래그 반사기 (SGDBR: Sampled Grating Distributed Bragg Reflector) 가 집적된 추출격자 분포 궤환 (SGDFB: Sampled Grating Distributed Feedback) 레이저 다이오드의 파장가변 특성을 시뮬레이션을 통하여 분석하였다. SGDFB 영역에 있는 위상제어 영역의 길이는 출력 광 파워와 파장가변 범위에 많은 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있었다. 또한 소자의 길이와 단면에서의 반사계수 및 단면의 위치에 의해 전체적인 파장가변 범위가 많은 영향을 받음을 확인하였다.

Abstract

In this paper, we analyzed tuning characteristics of the widely tunable SGDFB laser diode integrated with SGDBR. The improved time-domain model is used to analyse the laser diode. From the numerical analysis, the length of phase control region in the SGDFB section influences on the output power and the tuning range. Also, it was confirmed that the tuning range is affected by the length of the laser diode, the residual reflectivity at the facet, and the position of the facet.

Keywords: Tunable Laser Diode, Wavelength Division Multiplexing, Sampled Grating

I. 서론

현재의 파장 분할 다중화 (WDM: Wavelength division multiplexing) 광통신 시스템은 상업적으로 구현될 정도로 발전해 왔다. 이러한 WDM 시스템은 채널 사이의 파장간격이 100GHz이하인 DWDM(Dense WDM)으로 발전해 나아가고 있다. 이러한 시스템을 구성하기 위해서는 다양한 파장의 광원이 필요하고, 채널 간 누화(Crosstalk)를 줄이기 위해서는 각 파장의 광원

은 선폭이 작아야 하고 안정적으로 구동할 수 있어야 한다. 현재 WDM 광통신 시스템은 각 채널당 파장이 다른 단일 모드 레이저 다이오드로 구성되고 있다. 그러나 이러한 구성은 각 채널당 서로 다른 파장의 레이저 다이오드가 필요하기 때문에 시스템을 구성하는데 비용이 많이 들고, 시스템을 유지 및 보수하기 위한 백업용 광원도 모든 파장에 대해서 구비해야 하기 때문에 시스템을 유지하는데도 많은 비용이 필요하게 된다.

그러나 이러한 시스템에서 백업용 광원을 단일 모드 레이저 다이오드 대신 파장가변 레이저 다이오드를 사용하게 된다면 백업용 광원의 개수를 크게 줄일 수 있으므로 보다 작은 비용으로 시스템을 유지할 수 있게 된다. 그리고 파장가변 레이저 다이오드를 WDM 광통신 시스템의 광원으로 사용하게 된다면 현재의 단순한

* 정회원, 광운대학교 전자통신공학과
(Department Electronics and Communication Engineering, Kwangwoon University)

※ 이 논문은 2004년도 광운대학교 연구년에 의하여 연구되었음.

접수일자: 2005년5월31일, 수정완료일: 2005년9월14일

파장분할 방식의 전송시스템을 구성할 수 있을 뿐만 아니라 각 파장가변 레이저 다이오드의 파장을 동적으로 변화시켜 보다 효율적인 WDM 시스템을 구축할 수 있다. 또한 동적으로 파장가변이 가능한 파장가변 레이저 다이오드는 앞으로의 WDM 패킷 네트워크에서 핵심적인 부품으로 사용될 것으로 예상되며, 저가의 파장가변 레이저 다이오드는 현재 개발 중인 WDM-PON (WDM Passive Optical Network) 기반의 가입자 광통신 시스템에서 광원으로 사용할 수 있을 것으로 예상된다. 이외에도 XGM(Cross Gain Modulation)등의 특성을 이용하여 파장변환 시스템에서의 파장 가변 광원으로 사용할 수 있다. 이렇듯 발전과장을 제어가 가능한 광원은 광 전송 시스템을 구축할 때 많은 이점을 제공할 수 있다^[1-3].

이러한 이유로 다양한 구조의 파장가변 레이저 다이오드 구조와 제작에 대해서 오랫동안 연구되어 왔다^[4]. 넓은 파장가변 범위를 가지는 대표적인 파장가변 레이저 다이오드는 SGDBR (Sampled grating distributed Bragg reflector) 레이저 다이오드^[5], SSGDBR (Super-structure grating DBR) 레이저 다이오드^[6], GACC(Grating assisted codirectional coupler) 필터^[7]를 이용한 GCSR(Grating assisted codirectional coupler with rear sampled grating reflector) 레이저 다이오드^[8], TTG(Tunable twin guide) 레이저 다이오드^[9] 등이 있다. 이러한 파장가변 레이저 다이오드 이외에도 외부 공진기 레이저 다이오드^[10]와 같이 레이저 다이오드 외부에 반사기를 부착하여 공진 길이를 조절하는 파장가변 레이저 다이오드와 EDF(Erbium doped fiber)등을 이용한 파장가변 광섬유 레이저 다이오드 등이 있다^[11].

기존의 레이저 다이오드들은 넓은 파장가변 범위를 가지고, 파장가변 특성도 안정화되어 있지만 파장가변을 하기 위해서는 여러 전극이 필요하기 때문에 레이저 다이오드들을 구동하기 위해서는 복잡한 제어회로가 필요하게 된다. 정밀한 파장가변을 하기 위해서 이득영역 양단의 수동 도파로에 전류를 인가시켜 굴절률을 변화시키는데, 이때 발생하는 흡수 손실로 인해 레이저 다이오드의 출력 효율이 떨어진다는 근본적인 단점을 가지고 있다.

이러한 문제점을 극복하고자 새로운 구조의 파장가변 레이저 다이오드가 제안되었다. 제안된 레이저 다이오드는 위상 제어 영역이 삽입된 SGDFB (Sampled grating distributed feedback) 레이저 다이오드에 SGDBR 반사기를 집적시킨 구조이며, 위상제어 영역의

굴절률의 변화와 SGDBR 영역의 굴절률의 변화를 통해 연속적/불연속적 파장가변이 가능한 구조이다. 또한 이득영역에서 생성된 광파를 광섬유에 직접 결합시킬 수 있기 때문에 도파로에 의한 손실이나 파장가변을 위한 전류에 의해 발생하는 추가적인 손실에 대한 영향이 작아서 높은 출력 파워를 얻을 수 있다^[12].

본 논문에서는 이러한 구조의 레이저 다이오드의 파장가변 특성을 수치해석을 통해 분석하였다. 수치해석 결과 구조에 따라 45nm이상의 파장가변 범위를 가질 수 있음을 확인할 수 있었다. 다양한 경우에 대한 시뮬레이션을 통해 이러한 레이저 다이오드의 파장범위를 제한하는 요소들에 대해서 분석하였다. 논문의 구성은 II장에서 SGDBR이 집적된 파장가변 SGDFB 레이저 다이오드의 동작원리에 대해서 설명하고, III장에서 수치해석을 통해 제안한 레이저 다이오드 파장가변 특성과 이러한 특성에 영향을 미치는 요소들에 대해서 설명하며, IV장에 결과들을 정리하였다.

II. SGDBR이 집적된 파장가변 SGDFB 레이저 다이오드의 구조 및 동작원리

그림 1은 SGDBR이 집적된 파장가변 SGDFB 레이저 다이오드의 개략도이다. 그림에서 보는 바와 같이 레이저 다이오드는 크게 SGDFB 영역과 SGDBR 영역으로 나뉘어 진다. SGDFB 영역은 DFB 레이저 다이오드와는 달리 이득영역의 격자 구조가 추출격자(Sampled grating)의 형태로 되어 있고, 추출격자 사이에 위상제어 영역이 집적되어있다. 이 영역은 전류를 인가시켜 광파의 위상을 변화시키는 역할을 한다. SGDBR 영역은 수동 도파로 영역에 추출격자가 형성되어 있고 위상제어 영역과 마찬가지로 인가되는 전류에 의해 굴절률을 변화시킬 수 있는 구조로 되어 있다. 추출격자의 주기는 SGDFB 영역과 SGDBR 영역에서 서로 다르게 구성한다. 이 레이저 다이오드는 단면에 무반사 코팅(Anti-reflection coating)이 되어 있기 때문에 SGDFB 영역 발생하는 모드는 추출격자에 의해 생성되는 반사 스펙트럼의 피크에서 발생된다. 즉 DFB 레이저 다이오드와 달리 다중모드로 발전하게 된다. 각각의 모드는 반사 피크에서 생성되기 때문에 모드간의 파장간격과 반사 피크의 파장간격이 같게 된다. 이러한 SGDFB 영역의 모드간의 파장간격은 식 (1)을 통해 구할 수 있다^[13].

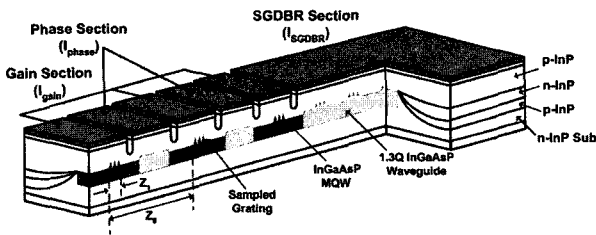


그림 1. SGDBR이 집적된 파장가변 SGDFB 레이저 다이오드의 구조

Fig. 1. The schematic of tunable SGDFB laser diode integrated with SGDBR.

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

여기서 λ_0 은 중심파장, n_g 는 도파로 내의 실효 군 굴절률 (Group index), Z_0 는 추출격자의 주기이다. 식 (1)을 통해 각 모드의 파장간격은 추출격자의 주기에 의해서 조절 가능함을 알 수 있다. 추출격자의 주기는 기존의 사진 인화 공정(Photo lithography)으로 쉽게 조절 가능하기 때문에 이러한 모드의 파장 간격은 쉽게 제어 가능하다.

그림 2는 SGDFB 영역에서 위상제어 영역의 구조를 개략적으로 나타낸 그림이다. 추출격자의 반사 스펙트럼의 피크는 각각의 격자에서 공진하는 광파가 위상정합 조건을 만족하는 파장에서 반사계수가 가장 크기 때문에 추출격자 사이에 수동 도파로 영역을 두고 굴절률을 조절하게 되면 반사스펙트럼의 피크 파장을 변화시킬 수 있다. 즉 각 발진 모드들의 파장 변화를 의미한다. 식 (2)에 이러한 구조에서 추출격자 사이를 공진하는 광파의 위상정합 조건을 나타내었다.

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

여기서 Γ 는 구속인자(Confinement factor), L 은 위상제어 영역의 길이, m 은 정수이다. 위상 제어 영역에서의 굴절률을 변화시키면(Δn) 위상정합 조건을 만족하는 파장(λ)이 변화하게 되어 각 모드의 파장이 변화하게 된다. 이러한 SGDFB 레이저 다이오드의 발진 스펙트럼을 시뮬레이션을 통해 살펴보면 그림 3과 같다. 여기서 추출격자의 주기는 $202.5\mu\text{m}$ 로 하였고, 추출격자의 격자 길이는 $6\mu\text{m}$ 로 하고 위상제어 영역의 길이는 $75\mu\text{m}$ 로 하였다. 이때 인가되는 전류는 200mA 이다. 추출격자의 반사에 의해 생성된 모드간의 파장 간격($\Delta\lambda$)은 식(1)에서 구한 값과 일치하였고, 일정한 간격으로 모드가 발

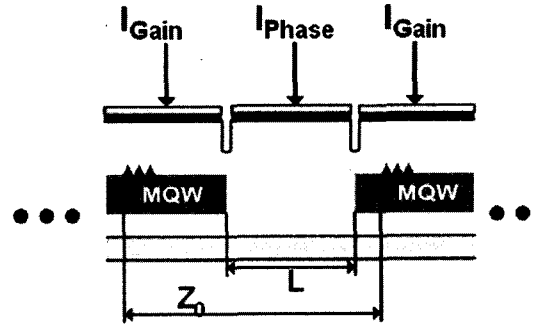


그림 2. 위상 제어 영역의 개략도

Fig. 2. The schematic of phase control region.

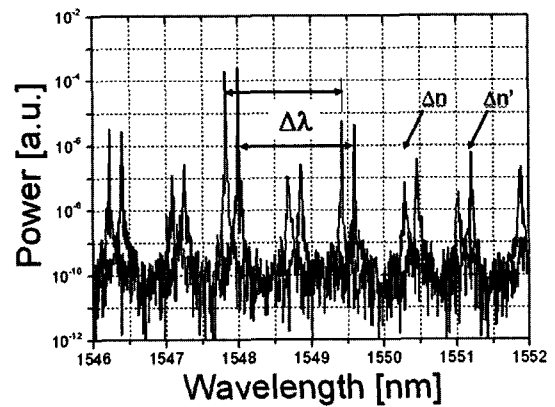


그림 3. SGDFB 레이저 다이오드의 스펙트럼

Fig. 3. The spectrum of SGDFB laser diode.

생함을 볼 수 있다. 그런데 그림 3에서 보면 반사 피크에서 발생한 모드 사이에 크기가 작은 모드가 발생함을 볼 수 있다. 이것은 반사 스펙트럼의 피크에서 발생하는 모드가 아니라 피크의 Sidelobe에서 발생하는 모드이다. SGDFB 레이저 다이오드에서 추출격자는 이득영역 내에 존재하고 추출격자의 주기가 길기 때문에 피크 사이의 Sidelobe에도 모드가 발생한다. 이 모드는 부모드 억제율에 영향을 주어 단일 모드 발진을 제한하는 역할을 한다. 위상제어 영역의 굴절률을 임의의 Δn 에서 $\Delta n'$ 으로 변화시켰을 때 반사 피크에서 발생한 모드들은 식(1)의 파장간격으로 유지되면서 파장이 변화됨을 시뮬레이션을 통해 확인되었다. 각 모드의 크기는 SGDBR의 반사 스펙트럼과 달리 불규칙적으로 발생하는데, 이는 SGDFB의 구조상 추출격자의 주기와 추출격자 길이의 비가 0.03 정도로 매우 작아서 유도 분포 반사율이 작아지므로 자발방출 잡음과 이득 스펙트럼의 영향을 많이 받기 때문이다.

이렇게 SGDFB 영역에서 추출격자에 의해 생성된 모드들 중 SGDBR에서의 반사 피크와 일치하는 파장에서 레이저 다이오드가 발진하게 된다. SGDBR 영역의

굴절률을 변화 시키면 각각의 반사 피크들의 파장이 변화하기 때문에 SGDBR의 반사 피크와 일치되는 모드가 순차적으로 변화하여 레이저 다이오드의 발진 파장이 변화하게 된다. 이러한 경우에는 각각의 발진파장은 일정한 간격을 가지고 발진하게 되며 발진파장의 간격은 각 모드간의 간격과 같게 된다. 또한 두 영역의 굴절률을 적절히 변화하게 되면 모드와 반사 피크를 동시에 변화시킬 수 있기 때문에 발진되는 파장을 앞의 경우와 달리 연속적으로 조절할 수 있게 된다.

III. 수치해석을 통한 파장가변 특성 해석

1. 개선된 시영역 모델

본 논문에서 수치해석 방법으로 개선된 유한차분 시영역 모델(Improved finite difference time domain model)을 사용하였다. 도파로를 따라 진행하는 광파는 식 (3)와 같이 표현할 수 있다.

$$E(x, y, z, t) = \Phi(x, y)[F(z, t)e^{-j\beta_0 z} + R(z, t)e^{j\beta_0 z}]e^{-j\omega_0 t} \quad (3)$$

여기서 $\Phi(x, y)$ 는 도파로의 모드 함수이고 $F(z, t)$, $R(z, t)$ 는 도파로의 종축방향으로 순방향과 역방향으로 진행하는 광파의 전계 진폭을 나타낸 함수이다. 브래그 격자가 있는 구조의 도파로에 대한 시간의존 결합 파동 방정식은 식 (4), (5)와 같이 표현 가능하다.

$$\frac{1}{c_g} \frac{\partial F(z, t)}{\partial t} + \frac{\partial F(z, t)}{\partial z} = (g - j\delta - \alpha_0/2 - \Gamma\alpha_e/2)F(z, t) + j\kappa R(z, t) + S_f \quad (4)$$

$$\frac{1}{c_g} \frac{\partial R(z, t)}{\partial t} + \frac{\partial R(z, t)}{\partial z} = (g - j\delta - \alpha_0/2 - \Gamma\alpha_e/2)R(z, t) + j\kappa^* F(z, t) + S_r \quad (5)$$

여기서 c_g 는 군속도이고, g 는 전계이득, α_0 는 도파로 내의 손실 계수, κ 는 결합계수, δ 는 브래그 조건에서 벗어난 정도를 나타내는 벗어남 인자, Γ 는 구속인자이고 S_f 와 S_r 는 자발방출 잡음을 나타낸다. 이러한 결합 파동 방정식을 전산화된 알고리즘으로 표현하기 위해서 유한차분법을 이용하여 근사화 시켰고, 이를 보다 안정화시킨 모델은 식 (6), (7)와 같다. 이 모델은 DBR/DFB 레이저 다이오드의 해석에 매우 유용한 모델로 알려져 있다^[14]. 표 1에 모델에 사용한 레이저 다이오드의 파라

표 1. 수치해석에서 고려한 레이저 다이오드 파라미터

Table 1. Parameters used in simulation.

Spontaneous Recombination Coeff.	B	$1.0 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$
Auger Recombination Coefficient	C	$0.75 \times 10^{-28} \text{ cm}^6 \text{ s}^{-1}$
Transparency Carrier Density	N_0	$1.5 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$
Coupling Coefficient	κ	200 cm^{-1}
Waveguide Loss	α_0	Active : 30 cm^{-1} Passive : 5 cm^{-1}
Confinement Factor	Γ	Active : 0.17 Passive : 0.51
Nonlinear Gain Suppression Coeff.	ϵ	$1.0 \times 10^{-17} \text{ cm}^3$
Group Index	n_g	3.7
Linewidth Enhancement Factor	a_m	3
Differential Gain	g_n	$4.0 \times 10^{16} \text{ cm}^2$
Waveguide Thickness	d	Active : $0.12 \mu\text{m}$ Passive : $0.23 \mu\text{m}$
Strip Width	w	$1.5 \mu\text{m}$

미터 값을 정리해 놓았다.

$$F(z + \Delta z, t + \Delta t) = G\Delta z F(z, t) + e^{-j\delta\Delta z} F(z, t) + j\kappa\Delta z R(z, t) + \Delta z S_f \quad (6)$$

$$R(z - \Delta z, t + \Delta t) = G\Delta z R(z, t) + e^{-j\delta\Delta z} R(z, t) + j\kappa^*\Delta z F(z, t) + \Delta z S_r \quad (7)$$

2. 위상제어 영역 길이의 영향

본 논문에서의 레이저 다이오드는 SGDBR 영역의 굴절률과 위상제어 영역의 굴절률의 변화를 통해 연속적/불연속적인 파장가변이 가능하게 된다. 여기서 위상제어 영역은 추출격자 분포 궤환 레이저 다이오드 내에 형성된 추출격자 사이에 존재하게 되는데, 이 영역은 에칭(Etching)과 재성장(Regrowth)과정을 통해 형성 가능하다. 이 영역은 이득영역 사이에 존재하기 때문에 레이저 다이오드 전체에 많은 영향을 미친다. 본 논문에서는 이 영역의 길이의 변화가 출력 광 파워와 모드의 파장변화에 미치는 영향에 대해서 살펴보았다.

이러한 영향에 대하여 살펴보기 위해서 SGDFB 레이저 다이오드 구조에 대해서 시뮬레이션을 수행하였다. 수치해석에 고려한 SGDFB 레이저 다이오드의 구조는 그림 4와 같다. 레이저 다이오드의 추출격자 주기는 $202.5 \mu\text{m}$ 이고, 격자의 길이는 $6 \mu\text{m}$, 레이저 다이오드

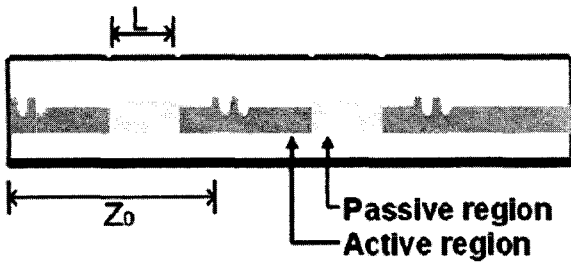
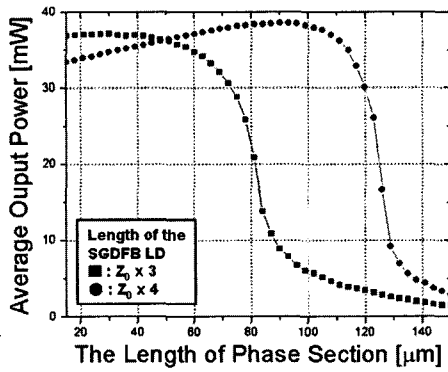
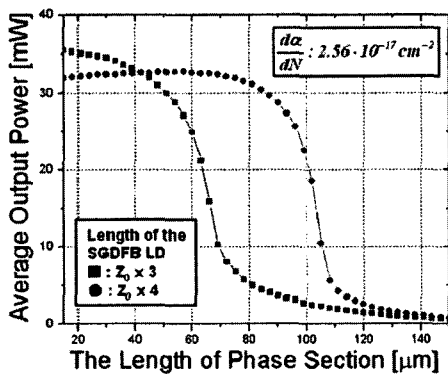


그림 4. SGDFB 레이저 다이오드의 개략도
Fig. 4. The Schematic of SGDFB laser diode.



(a)



(b)

그림 5. 위상제어 영역의 길이에 대한 출력 광 파워에 대한 영향

- (a) 위상제어영역 인가전류 0mA
- (b) 위상제어영역 인가전류 10mA

Fig. 5. The influence of the length of phase section on output power.

- (a) Phase control current 0mA
- (b) Phase control current 10mA

의 전체 길이는 추출격자 주기의 3배인 607.5 μm 와 4배인 810 μm 의 두 가지 경우에 대해서 고려하였다. 이득영역에 인가되는 전류는 200mA이고 양 단면은 무반사 코팅이 되어있다고 가정하였다. 그림 5는 이러한 구조의 레이저 다이오드에서 위상제어 영역의 길이에 따른 출력 광 파워의 변화를 나타낸 그림이다. 그림 5(a)는 위상제어 영역에 인가되는 전류가 없는 경우이고 5(b)는

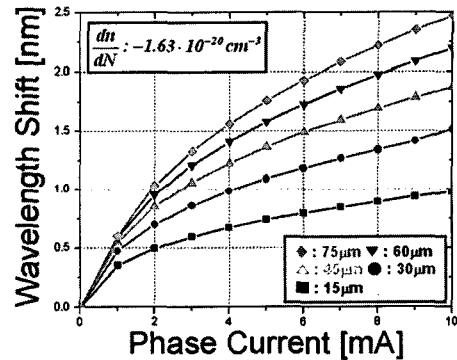


그림 6. 위상제어 영역에 인가되는 전류에 의한 모드의 파장변화

Fig. 6. The wavelength shift due to injection current in the phase control region.

10mA의 전류가 위상제어영역에 인가되었을 경우 결과이다. 여기서 위상제어 영역에 전류에 따른 Free carrier absorption에 의한 추가적인 도파로 손실은 $2.56 \times 10^{-17} \text{cm}^{-2}$ 으로 하였다^[15].

그림 5에서 보는 바와 같이 위상제어 영역이 특정한 길이 이상인 경우 출력 광 파워가 크게 작아지고 있음을 볼 수 있고, 인가되는 전류에 의해 위상제어 영역 내의 손실이 커지게 되면 출력 광 파워의 특성이 달라지는 것을 볼 수 있다. 즉 출력 파워와 위상제어 영역의 길이는 서로 반비례한다. 그런데 위상제어 영역의 길이가 작은 경우 소자의 길이가 작을수록 출력 파워가 더 크게 되는데 이는 동일한 전류에서 다이오드의 길이가 길어질수록 공진기 내부의 캐리어 밀도가 작아지기 때문이다. 그림 6은 위상제어 영역의 길이에 의한 각 모드의 파장 변화 정도를 살펴본 결과이다. 이때 고려한 레이저 다이오드의 길이는 추출격자 주기의 3배인 607.5 μm 로 고려하였고, 이득영역에 인가되는 전류는 200mA이다. 위상제어 영역길이가 길어질수록 파장변화가 크게 됨을 확인할 수 있다. 여기서 발견되는 광파의 모드 사이의 파장간격이 약 1.6nm이기 때문에 위상제어 영역의 길이를 30 μm 이상으로 해야 한다. 그러므로 이와 같은 결과를 통해 본 논문에서의 파장가변 레이저 다이오드 구조를 제작할 경우 높은 광 출력과 연속적인 파장가변을 위해서 SGDFB 영역의 위상제어 영역의 길이는 출력 광 파워와 모드의 파장이동에 대해서 서로 절충해야 하기 때문에 이 구조의 레이저 다이오드를 제작할 경우 위상제어 영역의 길이를 매우 신중하게 결정해야 한다.

3. 레이저 다이오드의 길이에 따른 파장가변 특성 제안한 추출격자 분포 브래그 반사기가 집적된 파장가변 추출격자 분포 궤환 레이저 다이오드는 추출격자 주기를 서로 다르게 구성하여 반사 스펙트럼의 피크가 일치되는 파장에서 발진하게 하는 SGDBR 레이저 다이오드와 구조가 비슷하기 때문에 식 (8)과 같은 반복 모드 간격 (Repeat mode spacing)의 계산을 통해 파장가변 범위를 예상할 수 있다.

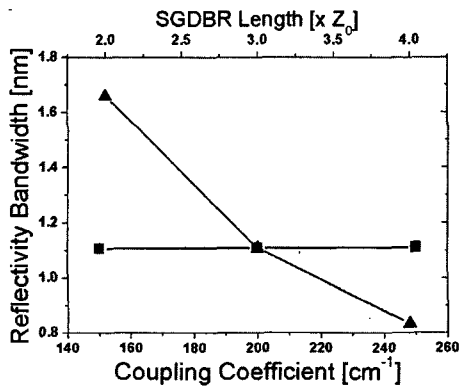
$$\Delta\nu_{rep} = \frac{c}{2n_g Z_0} \frac{Z_0'}{Z_0 - Z_0'} \quad (8)$$

위 식으로부터 두 영역의 추출격자의 주기의 차이가 작아질수록 발진파장의 범위가 증가함을 볼 수 있다. 그러나 주기의 차이가 작아질수록 부모드 억제율(Side mode suppression ratio)이 작아진다. 부모드 억제율을 유지하면서 파장가변 범위를 넓히기 위해서는 반사 스펙트럼의 대역폭을 좁게 해야 한다. 반사 스펙트럼의 대역폭은 식 (9)를 통해 구할 수 있다^[13].

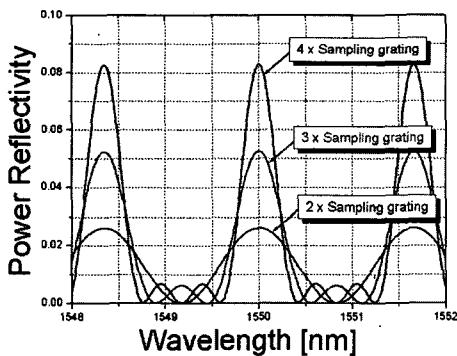
$$\lambda_{bw} = \frac{\lambda^2}{\pi n_g} \sqrt{|\chi|^2 + (\pi/L_{sg})^2} \quad (9)$$

여기서 L_{sg} 는 SGDBR 영역의 길이이고, λ 는 반사 피크에서의 파장이다. 반사 스펙트럼의 피크에서의 대역폭은 식에서 보는 바와 같이 결합계수와 SGDBR의 길이에 의해서 결정됨을 알 수 있다. 그림 7은 이러한 식을 통해 결합계수와 SGDBR의 길이의 변화에 따른 대역폭의 변화를 계산한 결과이다.

반사 스펙트럼의 피크에서의 대역폭은 그림 7에서도 볼 수 있듯이 결합계수에 대해서는 거의 영향이 없고, SGDBR 영역의 길이가 길어질수록 작아짐을 알 수 있다. 논문에서의 파장가변 레이저 다이오드는 각 영역의 추출격자 주기와 길이에 의해서 파장가변 범위가 영향



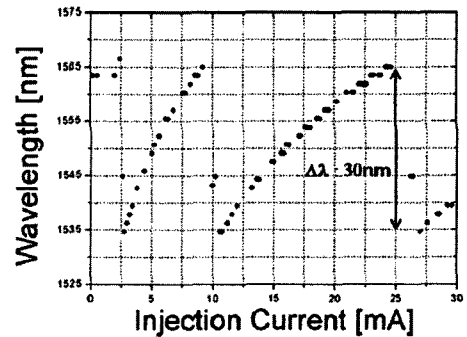
(a)



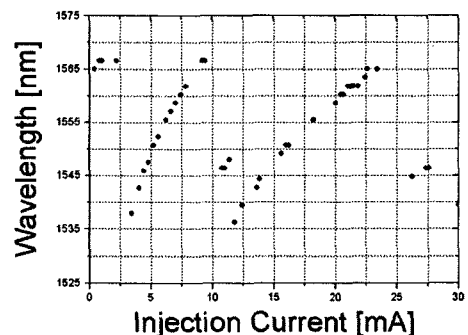
(b)

그림 7. (a) 결합계수와 SGDBR영역의 길이에 따른 반사 스펙트럼의 피크에서의 대역폭, (b) SGDBR 영역의 길이에 따른 반사 스펙트럼의 변화

Fig. 7. (a) The reflectivity bandwidth versus the length of phase section and coupling coefficient. (b) Reflectivity Spectra for several SGDBR section lengths.



(a)



(b)

그림 8. 각 영역의 길이가 추출격자 주기의 3배인 경우 SGDBR영역에 인가되는 전류의 변화에 따른 출력 파장의 변화. SGDBR 영역의 추출격자 주기: (a) 195.0μm, (b) 196.5μm

Fig. 8. The change of lasing wavelength due to injection current in the SGDBR section. The length of the sampled grating is three times the sampling period. The period of sampled grating in the SGDBR section: (a)195.0μm, (b)196.5μm.

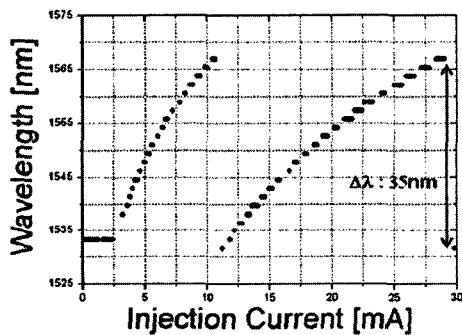
을 받고 있음을 알 수 있다.

그림 8은 SGDFB 영역과 SGDBR 영역의 길이가 추출격자 주기의 3배일 경우 SGDBR에 인가되는 전류에 따른 발진파장의 변화를 계산한 결과이다. 두 경우 모두 SGDFB 영역의 추출격자 주기는 202.5 μm 로 고정하였고 SGDBR 영역의 추출격자 주기는 그림 8(a)인 경우 195 μm 이고 그림 8(b)인 경우 196.5 μm 이다. 위상제어 영역의 길이는 75 μm 이고 격자길이는 SGDFB 영역에서는 6 μm , SGDBR 영역에서는 4.5 μm 이다. 시뮬레이션 결과 SGDBR의 전류변화에 의해 두 경우 모두 30nm 정도의 파장가변이 가능함을 볼 수 있다. 이 경우 두 영역의 추출격자 주기의 차이에 의해 결정되는 반복모드 간격은 각각 41.64nm와 52.51nm로 시뮬레이션을 통한 파장가변 범위와 반복 모드 간격과 많은 차이가 남을 확인할 수 있다. 그 이유는 다음과 같다. 반복모드 간격은 Vernier 효과에 의해 간격의 차이가 미세하게 다른 두

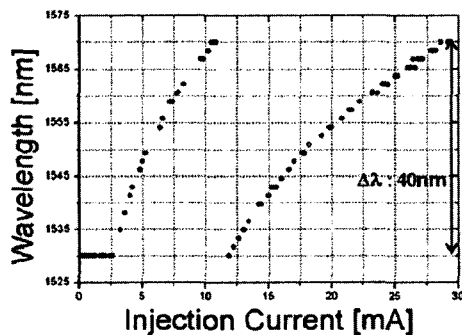
눈금이 다시 만나는 길이에 의해 유도된 식이므로 단순히 두 영역의 추출격자 주기에 의해 결정되는 값이다. 즉 이 값은 SGDFB 영역의 모드와 SGDBR 영역의 반사 스펙트럼의 대역폭이 무한히 작다고 가정했을 때의 잠재적인 파장가변 범위이다. 그러나 실제 고려한 SGDBR의 반사 스펙트럼 대역폭은 1.1nm 정도로 넓기 때문에, 시영역 모델을 통하여 측정된 파장가변 범위는 그림 8에 나타낸 것처럼 30nm정도로 반복모드 간격보다 작게 된다. 발진 파장의 범위가 반복 모드 간격에 보다 근접하도록 SGDBR 영역과 SGDFB 영역의 길이를 추출격자 주기의 4배인 경우에 대해서 시뮬레이션을 수행하였다. 이 경우 반사 피크의 대역폭이 약 0.8nm로 좁아지게 된다.

그림 9는 이러한 경우 SGDBR 영역의 전류 변화에 의한 파장가변 특성을 시뮬레이션을 통해 계산한 결과이다. 파장가변 범위는 앞의 경우 보다 각각 5nm, 10nm증가됨을 볼 수 있다. 이러한 결과를 통해 SGDBR이 집적된 파장가변 SGDFB 레이저 다이오드는 각 영역에서의 길이에 의해 파장가변 범위가 많은 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

그림 10은 SGDFB 영역과 SGDBR 영역의 길이에 따른 파장가변 범위를 시뮬레이션을 통해 계산하여 정리한 그림이다. 여기서 SGDBR 영역의 추출격자 주기는 196.5 μm 이고 이득영역에 인가되는 전류는 200mA이다. 두 영역의 길이가 추출격자 주기의 5배일 경우 파장가변 범위는 약 45nm로 증가됨을 볼 수 있다. 여기서 SGDFB영역의 길이가 SGDBR의 영역의 길이보다 큰 경우 전반적으로 부모드 억제율이 나빠지게 되는데, 이것은 이득영역에서 생성된 자발방출 잡음에 대한 영향



(a)



(b)

그림 9. 각 영역의 길이가 추출격자 주기의 4배인 경우 SGDBR영역에 인가되는 전류의 변화에 따른 출력 파장의 변화. SGDBR 영역의 추출격자 주기: (a) 195.0 μm , (b) 196.5 μm

Fig. 9. The change of lasing wavelength due to injection current in the SGDBR section. The length of the sampled grating is four times the sampling period. The period of sampled grating in the SGDBR section: (a) 195.0 μm , 196.5 μm .

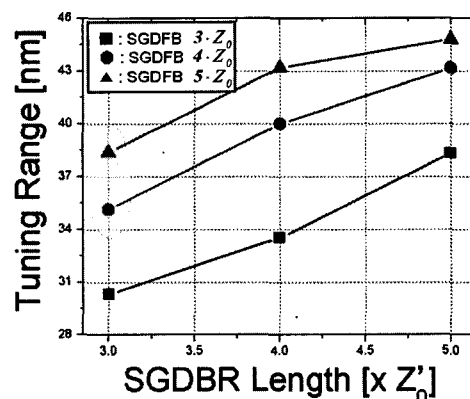


그림 10. SGDBR 와 SGDFB 영역의 길이에 따른 파장가변 범위의 변화

Fig. 10. The wavelength tuning range versus the length of SGDBR and SGDFB section.

이 더 커지기 때문이다

4. 잔유 반사율에 대한 영향

본 논문에서의 레이저 다이오드의 구조는 SGDBR 레이저 다이오드와 마찬가지로 추출격자에 의해 생성되는 파장에 따른 반사 스펙트럼의 특성을 이용하기 때문에 단면에서의 반사에 많은 영향을 받는다. 이러한 영향을 최소화하기 위해서 레이저 다이오드 양 단면에 무반사 코팅 (Anti-reflection coating)을 해야 한다. 논문에서 고려하는 구조의 파장가변 레이저 다이오드 단면에서 반사율 변화에 따른 파장가변 범위를 그림 11에 보였다. 고려한 레이저 다이오드의 구조는 SGDFB와 SGDBR영역의 길이는 추출격자 주기의 4배이고, 각 영역의 추출격자 주기는 202.5 μm 와 196.5 μm 이다. 위상제어 영역의 길이는 75 μm 이고 인가되는 전류는 200mA이다. 시뮬레이션 결과 단면 반사율에 따라 파장가변 범위가 큰 영향을 받고 있음을 볼 수 있다 이는 SGDFB 영역의 단면에서 반사되는 광파는 이득영역에서 증폭되기 때문에 그 영향이 크기 때문이다. 이러한 구조의 레이저 다이오드를 제작할 경우 1%이하의 매우 정밀한 무반사 코팅을 요함을 알 수 있다. 이는 반도체 광 증폭기 (Semiconductor optical amplifier)가 집적된 파장가변 레이저 다이오드의 요구되는 무반사 코팅정도이다^[16]. 단면에서 반사가 존재하게 된다면 반사계수에 대한 영향뿐만 아니라, 단면의 위치에 대한 영향을 받게 된다. 그림 12와 같이 단면의 위치가 추출격자의 시작점과 일치하는 경우 단면에서 반사되는 광파와 추출격자에 의해 반사되는 광파와 서로 보강간섭을 일으키기 때

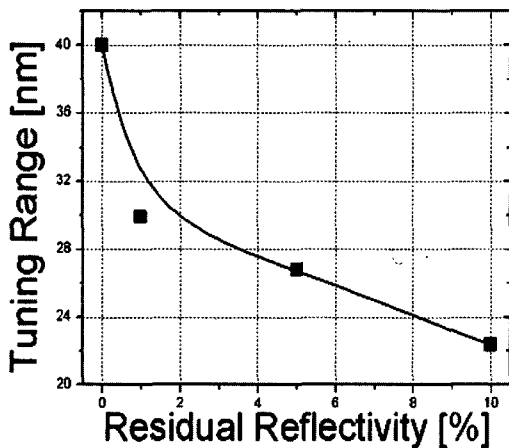


그림 11. 단면에서의 잔유 반사율의 변화에 따른 파장가변 범위의 변화
Fig. 11. The wavelength tuning range verses residual reflectivity at the facet.

문에 단면 잔유반사율에 의한 영향을 덜 받게 된다. 그러나 단면반사가 추출격자 사이에 존재하게 되면 단면에서 반사되는 광파와 추출격자에 의해 반사되는 광파가 서로 상쇄간섭을 일으키게 된다. 이러한 상쇄간섭은 추출격자에 생성되는 반사차수(Reflection order) 중 짝수 차 혹은 홀수 차에만 영향을 미치기 때문에 반사파

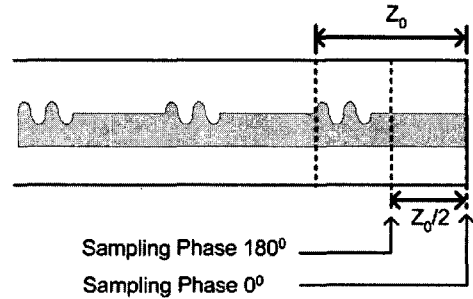
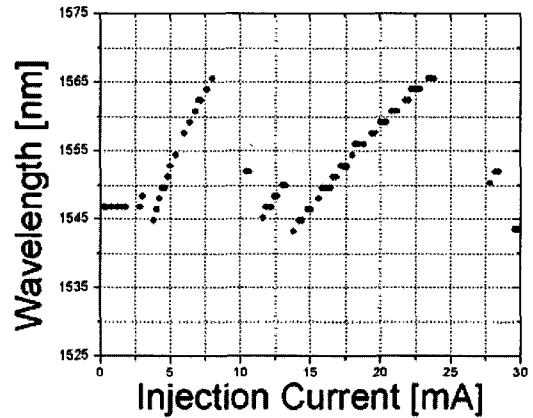
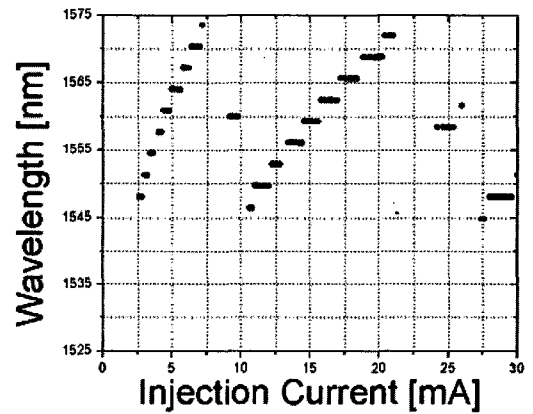


그림 12. Sampling phase의 정의
Fig. 12. The definition of sampling phase.



(a)



(b)

그림 13. 단면에서의 반사율이 10%일 때 파장가변 특성, 샘플링 위상: (a) 0° (b) 180°
Fig. 13. The tuning characteristics of the proposed laser diode When reflectivity at the facet is 10%, Sampling phase : (a) 0° (b) 180°.

크에서 두 주기 간격으로 반사 피크가 작아지게 된다. 단면의 위치가 추출격자의 시작점과 같을 경우 샘플링 위상(Sampling phase)를 0° 로 정의하고 추출격자 주기의 중간에 단면이 위치한 경우를 180° 로 정의한다.

그림 13은 단면반사율이 10%일 때 샘플링 위상에 대한 파장가변 범위에 대한 영향을 살펴보았다. 고려한 레이저 다이오드의 구조는 그림 11에서의 구조와 같은 구조이다. 샘플링 위상이 0° 와 180° 일 때 같은 단면 반사율이 같더라도 파장가변 특성이 서로 다를 수 있다. 샘플링 위상이 180° 일 때는 발진파장 간격이 0° 일 때 보다 더 크게 떨어져 있음을 볼 수 있다. 이는 앞서 설명한 데로 상쇄간섭에 의한 결과로 이 결과 위상제어 영역의 파장가변 범위에 벗어나기 때문에 어떠한 전류조건에도 원하는 파장을 발진시킬 수 없는 경우도 발생한다. 즉 본 논문에서의 파장가변 레이저 다이오드의 구조는 단면 반사율을 최소화 하면서 SGDBR 영역의 단면의 위치를 추출격자의 시작점을 일치하게 해야 함을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 시뮬레이션을 통해 SGDBR이 집적된 파장가변 SGDFB 레이저 다이오드의 파장가변 특성을 시뮬레이션을 통해 살펴보았다.

시뮬레이션 결과 위상제어 영역의 길이가 출력 광 파워와 SGDFB 영역의 모드의 파장가변 특성에 많은 영향을 미치고 있음을 확인하였다. 높은 파워를 유지하면서 전 파장 가변 범위에 걸쳐 연속적인 파장가변을 하기 위해서는 위상제어 영역의 길이를 적절히 선택해야 함을 확인하였다.

또한 논문에서 제안한 레이저 다이오드의 구조는 위상제어 영역으로 인해 추출격자 주기의 길이가 상대적으로 매우 길게 된다. 보다 넓은 파장가변 범위를 가지기 위해서는 반사 스펙트럼의 대역폭이 작아져야 한다. 반사 스펙트럼의 대역폭은 소자의 길이에 의해 많은 영향을 받기 때문에, 레이저 다이오드의 파장가변 특성은 소자의 길이에 의해 많은 영향을 받음을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. SGDBR 영역과 SGDFB 영역의 소자 길이가 추출격자 주기의 5배인 경우 45nm 정도의 파장가변 범위를 가질 수 있음을 확인하였다. 또한 SGDFB 영역의 길이가 SGDBR 영역의 길이보다 긴 경우 자발 방출 잡음에 대한 영향이 커지기 때문에 부모드 억제율이 낮아짐을 확인할 수 있었다.

단면에서 반사되는 광파는 이득영역에서 증폭되어 레이저 다이오드에 영향을 미치기 때문에 단면에서의 반사율에 의해 레이저 다이오드의 파장 가변 범위가 제한되고 있음을 확인하였다. 넓은 파장가변 범위를 가지기 위해서는 단면에서의 반사율이 1% 이하를 유지해야 함을 알 수 있었다. 단면의 위치에 의해 결정되는 샘플링 위상도 파장가변 특성에 영향을 많은 영향을 미치고 있음을 확인 할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [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, March 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, p 377-379, March 1997.
- [3] P. J. Williams, D. J. Robbins, F. O. Robson, N. D. Whitbread, "High power and wide quasi-continuous tuning, surface ridge SG-DBR lasers," Proceedings of ECOC'2000, Munich, Germany, Sept. 2000.
- [4] L. A. Coldren, "Monolithic tunable diode lasers," IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 6, No. 6, pp. 988-999, Nov/Dec 2000.
- [5] V. Jayaraman, D. A. Cohen, and L. A. Coldren, "Demonstration of broadband tunability in a semiconductor laser using sampled gratings," Applied Physics Letters, Vol. 60, No. 19, pp 2321-2323, May 1992.
- [6] F. Kano, H. Ishii, T. Tohmori and Y. Yoshikuni, "Broad range wavelength switching in superstructure grating distributed Bragg reflector lasers." Electronics Letters, Vol. 29, No. 12, pp 1091-1092, June 1993.
- [7] Z. M. Chuang, L. A. Coldren, "Design of widely tunable semiconductor lasers using grating-assisted codirectional-coupler filters," IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 29, No. 4, pp. 1071-1080, April 1993.
- [8] M. Oberg, S. Nilsson, K. Streubel, J. Wallin, L. Backbom, and T. Klinga, "74nm wavelength tuning 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, July 1993.
- [9] G. Morthier, B. Moeyersoon, R. Baets, "A $\lambda/4$ -shifted sampled or superstructure grating widely tunable twin-guide laser," IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 13, No. 10, pp.1052-1054, October 2001.
- [10] Z. M. Chung, D. A. Cohen, L. A. Coldren, "Tuning characteristics of a tunable-single-frequency external-cavity laser," IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 26, No. 7, pp. 1200-1205, July 1990.
- [11] S. Yamashita, "Widely tunable erbium-doped fiber ring laser covering both C-band and L-band", IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 7, No. 1, pp. 41-43, January/February 2001.
- [12] S. Kim, Y. Chung, S. H. Oh, M. H. Park, "Design and analysis of widely tunable sampled grating DFB laser diode integrated with sampled grating distributed Bragg reflector", IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 16, No.1, pp. 15-17, January 2004.
- [13] 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 Electron., vol. 29, no. 6, pp. 1824-1834, 1993.
- [14] B. S. Kim, J. K. Kim, Y. Chung, S. H. Kim, "Time-domain large signal analysis of widely tunable DBR laser diode with periodically sampled and chirped gratings," IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 10, No. 1, pp 39-41, January 1998.
- [15] 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, August 1994.
- [16] B. Mason, B. J. Barton, G. A. Fish, L. A. Coldren, S. P. Denbaars, "Design of sampled grating DBR lasers with integrated semiconductor optical amplifiers," IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 12, No. 7, pp. 762-764, July 2000.

 저 자 소 개



김 수 현(정회원)
 1997년 광운대학교
 전자통신공학과(공학사).
 1999년 광운대학교
 전자통신공학과
 (공학석사).
 2002년~현재 광운대학교 전자통
 신공학과 박사과정.

<주관심분야 : 통신, 광소자, 반도체>



정 영 철(정회원)
 1981년 서울대학교 전자공학과
 (공학사).
 1983년 한국과학기술원 전기 및
 전자공학과(공학석사).
 1992년 Electrical and Computer
 Engineering(박사),
 University of California,
 Santa Barbara(UCSB).

1981년~1986년 LG전선기술연구소.

1987년~1988년 한국과학기술연구원(KIST)

1992년~1993년 Optoelectronics Technology Center
 (UCSB) 연구원.

1993년~현재 광운대학교 전자통신공학과 교수.

<주관심분야 : 광통신용 소자 및 광통신 시스템>