

論文 98-35D-8-8

전계흡수변조기가 집적된 광대역 파장가변 SGDBR/SSGDBR 레이저 다이오드의 동적특성

(Dynamic characteristics of widely tunable SGDBR/SSGDBR laser diodes integrated with an electroabsorption modulator)

金炳星*, 鄭榮哲*, 金善鎬**

(Byoung Sung Kim, Youngchul Chung, and Sun Ho Kim)

요 약

전계흡수변조기가 집적된 광대역 파장가변 SGDBR/SSGDBR 레이저 다이오드의 동적특성을 개선된 대 신호 시영역 모델을 이용하여 조사하였다. 먼저 SGDBR 레이저 다이오드와 SSGDBR 레이저 다이오드의 광대역 동적 파장가변 특성을 해석하고 서로 비교한다. 그리고, 전계흡수변조기가 집적된 SGDBR 레이저 다이오드의 강도변조 특성을 조사하였다. 거의 같은 소멸비에 대하여 외부변조를 할 때의 주파수 처평량이 직 접변조보다 20 분의 1 정도로 매우 적다는 것과, 전계흡수변조기의 광게이팅 특성을 이용하여 거의 변환제한 된(nearly transform-limited) 펄스열을 생성할 수 있음을 보였다.

Abstract

Dynamic characteristics of widely tunable SGDBR/SSGDBR laser diodes integrated with an electroabsorption modulator is investigated using an improved large-signal time-domain model. First, wide tuning properties of a SGDBR laser diode and a SSGDBR laser diode are analyzed respectively and compared with each other. And, intensity-modulation characteristics of a SGDBR laser diode incorporating an electroabsorption modulator are investigated. It is shown that an external modulation has the lower frequency chirp by 1/20 for almost same extinction ratios than a direct modulation, and a nearly transform-limited pulse train can be generated using the optical gating of an electroabsorption modulator.

* 正會員, 光云大學校 電子工學部/電子通信工學科 新技術研究所

(Dept. of Elec. Comm. Eng., School of Electronics Eng., The Institute of New Technology, Kwangwoon University)

** 正會員, 韓國科學技術研究院 情報電子研究部 光技術研究센터

(Photonics Research Center, Division of Information and Electronics, Korea Institute of Science and Technology)

接受日: 1998年2月25日, 수정완료일: 1998年6月11日

I. 서론

파장가변 레이저 다이오드는 파장분할다중(wavelength division multiplexing)과 패킷스위칭(packet switching) 시스템에서 매우 중요한 소자로 여겨지고 있다^[1,2]. 그리고 발진파장이 가변되는 짧은 폭 펄스 열의 생성은 초고속 파장분할 광통신 시스템의 구현에 핵심이 되는 기술이다. 또한 SG(sampled grating) DBR 또는 SSG(super structure grating) DBR (distributed Bragg reflector) 레이저 다이오드는 동작파장을 광대역으로 가변할 수 있는 소자로서 많은 연구가 이루어지고 있다^[3-9]. 이 소자는 복수개의 능

동, 수동 영역, 그리고 브래그 격자로 이루어져 있는 복합소자로, 60 nm 이상의 광대역 파장가변 범위에서 안정된 발진을 할 수 있다.

그리고, 직접변조된 반도체 레이저 다이오드는 단일 모드로 빛을 방출하고 있을때라도, 레이저가 켜지고 꺼짐에 따라 캐리어밀도의 변화가 수반되어, 비교적 큰 동적 주파수 처핑이 발생하게 되는 특성을 가지고 있다. 이러한 큰 주파수 처핑에 의해 발생하는 동적 선폭 증가는 고속 장거리 광통신 시스템의 성능에 상당한 페널티를 야기하게 된다. 이것을 해결하기 위한 방안 중의 하나가 전계흡수변조기를 연속파를 발진하는 레이저 다이오드에 집적하고, 집적된 변조기를 외부변조를 함으로써 변조동안에 발생하는 동적 주파수 처핑을 상당히 낮게 유지하는 것이다.

또한, 연속파 발진 레이저 다이오드에 전계흡수변조기를 집적한 소자에서도, 외부변조를 이용하여 고속의 짧은 폭 펄스열을 생성할 수 있는데, 짧은 폭을 갖는 펄스열을 발생시킬 수 있는 원리는 정현신호에 의하여 구동되는 전계흡수변조기의 광케이팅 특성에 기인한다 [10,11]. 짧은 폭 광펄스는 광통신 시스템, 광스위칭, 전광(electro-optic) 샘플링, 광샘플링, A-D(analog-to-digital) 변환 등에 응용될 수 있다.

제 2 장에서는 개선된 대신호 시영역 모델을 자세히 설명하고, 제 3 장에서는 SGDBR 레이저 다이오드와 SSGDBR 레이저 다이오드의 광대역 파장가변특성에 대하여 논한다. 그리고 제 4 장에서는 외부 전계 흡수변조기가 집적된 SGDBR 레이저 다이오드의 강도변조특성과 짧은 폭 펄스열 생성에 관하여 기술하고 있다. 마지막으로 제 5 장에서 결론을 맺는다.

II. 개선된 대신호 시영역 모델

대신호 시영역 모델(large-signal time-domain model)은 레이저 공진기 내에서의 순방향전파(forward wave)와 역방향전파(reverse wave)의 흐름을 표현하는 결합파동방정식(coupled wave equation)을 전산화한 시단계 알고리즘과, 캐리어와 광자의 상관관계를 나타내는 율방정식을 시간의 흐름과 함께 자기유지적(self-consistent)으로 반복하여 해를 구하는 것이다. 또한 레이저 공진기 내에서의 물질 고유의 파라미터와 구조에 따른 변화를 매우 쉽게 고려할 수 있는 장점이 있다. 본 논문에서는 벗어남인가가 광전력에

불필요하게 영향을 주는 오류를 제거한 수정된 시단계 알고리즘을 제안한다.

1. 시간의존 결합파동방정식 광도파로 내에서 전파하는 빛은

$$E(t, z) = [F(t, z)e^{-i\beta_0 z} + R(t, z)e^{i\beta_0 z}]e^{i\omega_0 t} \quad (1)$$

와 같이, 순방향전파와 역방향전파의 합으로 이루어진 전계(electric field)로 표현되어질 수 있다. 여기서 ω_0 는 시간축에 대응하는 중심주파수이고, β_0 는 브래그(Bragg) 주파수에서의 전파상수를 나타낸다. $F(t, z)$ 와 $R(t, z)$ 는 광도파로의 임의의 진행축인 z 축을 따라 순방향으로 전파하는 전계와 역방향으로 전파하는 전계를 나타낸다. 이러한 진행파는 이득, 손실, 결합(coupling)이 있는 보편적인 광도파로 내에서의 전계의 변화를 나타내고 있는 시간의존 결합파동방정식(2)를 만족하게 된다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{c_g} \frac{\partial F(t, z)}{\partial t} + \frac{\partial F(t, z)}{\partial z} \\ = (g - i\delta_b - a_o/2 - \Gamma a_o/2)F(t, z) + ixR(t, z) + S, \end{aligned} \quad (2-1)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{c_g} \frac{\partial R(t, z)}{\partial t} - \frac{\partial R(t, z)}{\partial z} \\ = (g - i\delta_b - a_o/2 - \Gamma a_o/2)R(t, z) + ixF(t, z) + S, \end{aligned} \quad (2-2)$$

여기서 $F(t, z)$ 와 $R(t, z)$ 는 크기와 위상을 함께 포함하고 있는 복소수이다. c_g 는 군속도(group velocity)를 나타내며, 임의의 주파수에서 일정하다고 가정되어진다. g 는 전계이득, a_o 는 도파로내에서 흡수와 산란 등에 의하여 선천적으로 발생하게 되는 전력손실계수이고, a_e 는 전계흡수변조기 등에서 의도적으로 유발되어지는 전력흡수계수이다. x 는 한방향 전파가 다른 방향으로 진행하는 전파에 얼마나 결합되어지는가를 나타내는 결합계수를 나타낸다.

2. 자발방출잡음

식 (2)에서 S_f 와 S_r 은 자발방출잡음을 나타내는 파라미터로, 레이저 다이오드 발진시 구동원으로 작동하게 된다. 여기서 S_f 와 S_r 은 서로 크기는 같지만, 위상은 랜덤하게 변하는 가우시안 분포를 갖는 전계이다 [12]. 이러한 자발방출 잡음은 다음의 상관관계를 가진다.

$$\langle s(z, t) s^*(z', t') \rangle = BR_{sp} \delta(t-t') \delta(z-z') / c_g \quad (3-1)$$

$$\langle s(z, t) s(z', t') \rangle = 0 \quad (3-2)$$

여기서 $R_{sp}(=BN^2/L)$ 는 단위길이당 전자-정공 재결합 비율을 나타내는 파라미터이다. 여기서, B 는 자발방출계수, L 은 활성영역의 길이, N 은 캐리어밀도, β 는 자발결합인자, 그리고 $\delta(x)$ 는 δ -함수이다.

3. 전계이득

전계가 광도파로를 진행하면서 전계이득을 얻게되는데, 그 양은

$$g(z, t) = \frac{\Gamma g_N(N(z, t) - N_0)}{2(1 + \epsilon P)} \quad (4)$$

로 쓰여질 수 있다. 여기서 Γ 는 광도파로 내에서 전계가 활성층(active layer)에 얼마나 중첩되어 있는가를 나타내는 구속인자이고, g_N 은 캐리어밀도 변화량에 대응하여 전계이득의 변화하는 정도를 나타내는 차분이득이다. 또한 N_0 는 투명(transparency) 캐리어 밀도, P 는 광자밀도, 그리고 ϵ 은 이득억제계수로 전계이득과 광자밀도와의 비선형관계를 나타낸다.

4. 벗어남인자

식 (2)에서 δ_b 는 중심파장이 브래그 조건(Bragg condition)에서 얼마나 벗어나 있는지를 나타내는 벗어남인자(detuning factor)로 정의되는데,

$$\delta_b = \frac{\omega_0}{c} n_{eff}(z, t) - \frac{\pi}{\Lambda} \quad (5)$$

와 같이, 캐리어밀도가 변함에 따라, 그에 대응하여 굴절율이 따라서 변하기 때문에, 브래그 조건에서 중심 파장이 벗어나게 된다. 식 (5)에서 $n_{eff}(z, t)$ 는 캐리어 밀도 변화에 따른 실효굴절율로

$$n_{eff}(z, t) = n_{eff0} - \frac{\lambda}{4\pi} \Gamma a_m g_N \Delta N(z, t) \quad (6)$$

와 같은데, 여기서 n_{eff0} 는 캐리어밀도가 $N = N_0$ 일 때의 실효굴절율이고, a_m 은 선평증가인자이다.

5. 율방정식

시간의존 결합파동방정식에 있는 파라미터의 값은 캐리어밀도의 시간과 공간에 따른 변화의 주도로 변하게 되는데, 이러한 시간에 따른 캐리어밀도의 변화는 율방정식(rate equation) (7)로 표현되어진다.

$$\frac{dN}{dt} = \frac{J}{ed} - BN^2 - CN^3 - \frac{c_{sg} g_N (N - N_0) P}{1 + \epsilon P} \quad (7)$$

여기서 J 는 전류주입밀도 [A/cm^2], e 는 전하량, d 는 활성층의 두께, C 는 오제 캐리어 재결합 계수를 나타낸다. 그리고 $P(=|F|^2 + |R|^2)$ 는 정규화된 광자 밀도이다. 공간 전파에 따른 캐리어밀도의 변화와 그에 따른 파라미터들의 변화는 결합파동방정식을 유한 차분법으로 근사화한 알고리즘(식 (8))으로부터 구하여질 수 있다.

6. 시단계 알고리즘

시간의존 결합파동방정식 식 (2)는 레이저 공진기를 일정한 길이 $\Delta z(=c_g t)$ 를 갖는 작은 섹션들로 나누어, 전산기를 이용하여 수치해석적으로 풀 수 있다. 결합 파동방정식의 좌항에 유한차분 근사화를 적용하고, 이차 미분항을 무시하면,

$$F(t + \Delta t, z + \Delta z) = \Delta z(g - a)F(t, z) + e^{-\Delta z i \delta} F(t, z) + \Delta z i x R(t, z) \quad (8-1)$$

$$R(t + \Delta t, z - \Delta z) = \Delta z(g - a)R(t, z) + e^{-\Delta z i \delta} R(t, z) + \Delta z i x F(t, z) \quad (8-2)$$

과 같은 시단계 알고리즘을 구할 수 있다. 식 (8)을 이용하면, 위치 z 와 시간 t 에 대한 전계값을 알면, 위치 $z + \Delta z$, 시간 $t + \Delta t$ 에서의 순방향전계값과, 위치 $z - \Delta z$, 시간 $t + \Delta t$ 에서의 역방향전계값을 알 수 있다. 이 알고리즘은 활성영역과 SGDBR/SSGDBR과 같은 수동영역이 있는 복합 레이저 다이오드의 모델링에 매우 유용하다 [8,13].

그리고 식 (8)과 같은 시단계 알고리즘으로 전파해 나가는 전계값의 변화를 예측하여 계산하다가, 최종 레이저 단면에서의 순방향 그리고 역방향 전계는

$$F(t, 0) = r_1 R(t, 0) \quad (9-1)$$

$$R(t, L) = r_2 F(t, L) \quad (9-2)$$

의 경계조건(boundary condition)을 만족하여야 한다. 여기에서 레이저 공진기의 왼쪽단면을 $z = 0$ 로 가정하였고, 식 (9)에서 $r_{1,2}$ 는 양단면에서의 전계 반사율이다.

7. 유한 이득대역폭

일반적인 레이저 다이오드의 활성영역의 이득은 파장의 함수로 주어지게 되고, 레이징된 광의 특성에 따라 전계이득을 모두 고려하여야만 하는 경우가 있게 된다. 즉, 광대역 파장가변 레이저 다이오드 또는 변환 제한된(transform-limited) 펄스를 생성하는 레이저

다이오드는 이득대역폭의 한계를 명확하게 정하여 주어야 한다. 주파수에 대한 이득스펙트럼상에서의 분포는 IIR(infinite impulse response) 디지털필터^[14]를 사용하여 고려할 수 있는데, 입력은 주파수축의 무한임펄스열이고, 전달함수는 주파수의 함수인 이득이 된다. 전산모델링에서 사용되는 디지털필터의 이산화된 구현은

$$F(z + \Delta z, t + \Delta t) = F(z, t) + A[F(z + \Delta z, t) - F(z, t)] \quad (10)$$

이다. 여기서, $A = \eta \exp(j\omega_b t)$ 이고 F 는 순방향으로 전파하는 전계로, 역방향전계 R 에 대해서도 같은 방법으로 필터링한다. 디지털필터의 대역폭은 실제 이득의 대역폭과 최대 근사화가 되도록 η 와 ω_b 를 정한다.

레이저 공진기 내에서는, 공간적으로 일정한 주입전류를 인가한다고 해도, 공진기내에서 발생된 광전력은 매 시간 단계마다 그리고 위치에 따라 다르게 된다. 따라서 율방정식에 의하여, 서로 다른 광전력은 그에 따른 캐리어밀도 변화를 가져오게 되고, 이것은 다시 전계이득에 영향을 준다. 다시 말해서, 소자 내에서의 시간과 위치에 대한 광전력, 캐리어밀도, 전계이득 등의 파라미터들은 서로 유기적인 관계를 가지고 있으며, 대신호 시영역 모델은 이러한 관계를 모델링하는데 매우 유용하다.

III. 광대역 파장가변 SGDBR/SSGDBR 레이저 다이오드

본 장에서는 SGDBR 레이저 다이오드와 SSGDBR 레이저 다이오드의 동적 파장가변 특성을 조사, 비교한다. 그림 1은 레이저 다이오드의 도파로 방향으로의 단면도이다. 활성 영역은 480 μm , 전/후 반사기(front/rear reflector)는 각각 495 μm 길이로 레이징 영역의 총길이는 1470 μm 이다. 후 반사기의 격자의 변조주기는 49.5 μm 이고, 전 반사기의 격자 변조주기는 45 μm 길이다. SGDBR 레이저 다이오드에서 버스트 격자의 길이는 3 μm 이고, SSGDBR 레이저 다이오드에서는 격자부분에 굴절율변화가 없을 때 한 변조주기 동안의 브래그 파장이 1.5 μm 에서 1.6 μm 로 변하게 격자의 주기를 조절하였다. 변조주기 안에서의 격자주기의 큰 변화는 반사기의 반사스펙트럼에서 넓은 대역폭을 얻게 하는 효과가 있다. 결합계수는 SGDBR, SSGDBR 레이저 다이오드에 대하여 각각

200 cm^{-1} , 70 cm^{-1} 이다. 해석에서 활성 영역과 DBR 단과의 결합효율은 1이고, 양 영역간의 굴절율차에 의한 내부반사는 없다고 가정한다. 양 반사기에서 굴절율변화가 없을 때, 레이저 다이오드는 1.55 μm 에서 발진한다고 가정한다. 그리고 모델에서 사용된 다른 파라미터는 표 1 에 정리되어 있다.

표 1. 해석에 사용된 파라미터

Table 1. Parameters used in the analysis.

자발 재결합 계수, B	$1.0 \times 10^{10} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$
오제 캐리어 재결합 계수, C	$1.3 \times 10^{-26} \text{ cm}^6 \text{ s}^{-1}$
투명 캐리어 밀도, N_0	$1.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
전류주입이 없을 때의 실효 위상굴절율, $n_{\text{eff},0}$	3.283
실효 굴절율, n_x	3.7
활성영역에서 활성층의 두께, d_{act}	0.048 μm
반사기에서 코어의 두께, d_{ref}	0.23 μm
자발 결합 계수, β	0.5×10^{-4}
도파로 손실, α	반사기 5 cm^{-1} 활성영역 30 cm^{-1}
비선형 이득 억제 계수, ϵ	$1.0 \times 10^{-11} \text{ cm}^3$
선폭 증가 인자, a_m	3 ~ 8
차분 이득, g_N	$3.0 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$
광속 인자, Γ	0.082

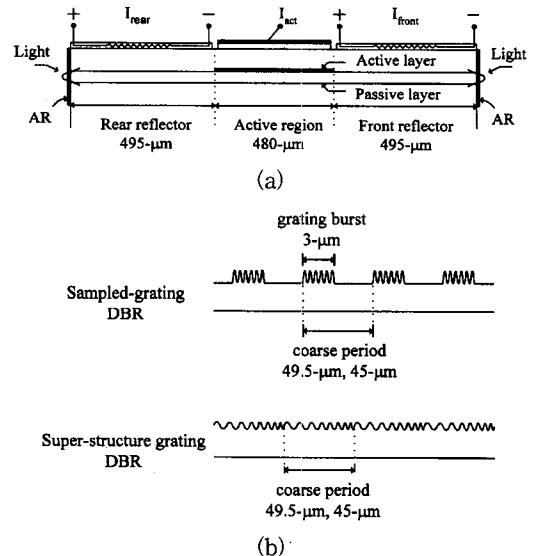


그림 1. (a) 광대역 파장가변 DBR 레이저 다이오드의 개략도 (b) SG(sampled grating) DBR 과 SSG(super structure grating) DBR의 모양

Fig. 1. (a) Schematic drawing of a widely tunable DBR laser diode (b) Reflector configurations of a sampled grating DBR and a super structure grating DBR.

이득의 주파수 대역폭은 약 100 nm 넓이($\eta = 0.002$)이고, 중심(ω_0)은 1.55 μm 파장에 놓여진다.

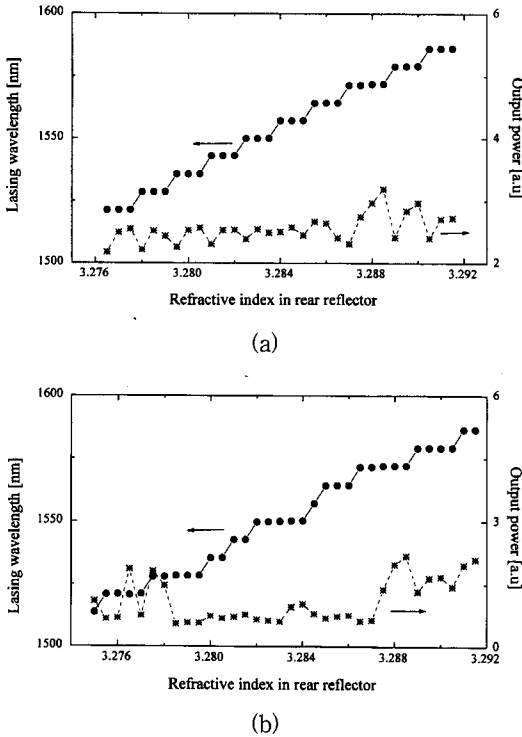


그림 2. 광대역 파장가변 특성
(a) SGDBR 레이저 다이오드, (b) SSGDBR 레이저 다이오드
Fig. 2. Wide-tuning properties of (a) a SGDBR laser diode and (b) a SSGDBR laser diode.

그림 2(a)와 2(b)는 SGDBR, SSGDBR 레이저 다이오드에서, 후 반사기에서의 굴절률변화에 의해 발생되는 발진파장의 변화와 출력되는 전력의 변화를 보이고 있다. 파장가변 범위는 7.2 nm 간격으로 각각 64.8 nm, 72 nm 이다. 레이저의 출력이 정상상태로 도달하기 전의 과도상태 또는 임의의 굴절률변화에 대하여, 채널간(inter-channel) 또는 채널내(intra-channel) 모드간의 경쟁이 관측되었다. 예를 들어 1572 nm 와 같은 파장 주변에서는 레이징 모드가 레이저 공진기의 모드간격에 해당하는 약 52 GHz 만큼 떨어진 다른 모드로 넘어가는 홉핑(hopping)이 발생한다. 그림 2 에서 볼 수 있듯이, 레이징 모드 홉핑은 출력 전력의 큰 변화를 수반하고 있는데, 이는 공진기의 모드마다 서로 다른 거울반사율의 영향을 받기 때문이다.

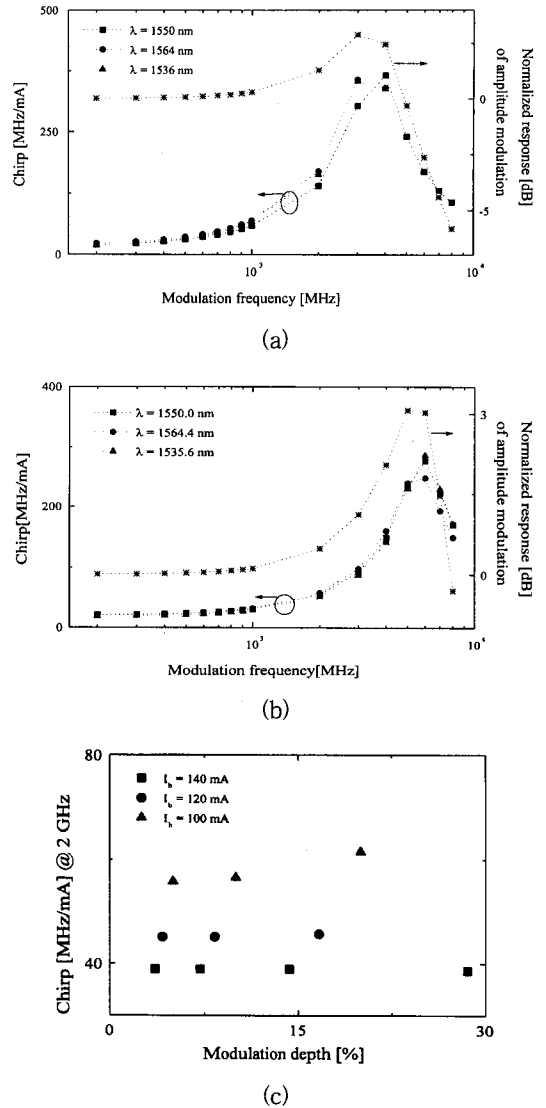


그림 3. 진폭변조와 주파수변조의 동적응답
(a) SGDBR 레이저 다이오드, (b) SSGDBR 레이저 다이오드, (c) SSGDBR 레이저 다이오드에서 변조깊이에 대한 치핑특성
Fig. 3. Dynamic responses of amplitude modulation and frequency modulation. (a) a SGDBR laser diode, (b) a SSGDBR laser diode (c) chirping properties for the modulation depths in SSGDBR laser diode.

그림 3 에서 보여지는 동적 AM(amplitude modulation), FM(frequency modulation) 응답특성의 경향이 실험적인 결과와 잘 일치하고 있다^[31]. SGDBR 레이저 다이오드에서, 바이어스 전류와 출력 전력은 각각 80 mA, 2 mW 이고, SSGDBR 레이저

다이오드에서는 각각 100 mA, 2.4 mW 이다. 200 MHz 에서의 AM 응답은 SGDBR, SSGDBR 레이저 다이오드에 대해서 각각 0.053, 0.035 mW/mA 이다. 다른 주파수에서의 AM 응답은 200 MHz 의 값으로 정규화 되어진다. 안정된 모든 발진 파장에 대하여, 처핑은 거의 같은 값을 보이며, 변조주파수가 증가함에 따라 커지는 경향을 보인다. 변조 깊이의 함수로서의 처핑 특성이 그림 3(c)에 나타나 있다. 이때 변조 주파수는 2 GHz 이다. 바이어스 전류가 증가함에 따라 처핑은 감소하는 반면, 고정된 바이어스전류에 대해서는 변조깊이의 변화에 대하여 거의 변하지 않는다. 변조깊이가 30 % 를 넘어가게 되면, 변조된 구형 광펄스에 현저한 하모닉 왜곡이 관측되었다. 양 반사기가 바이어스 되지 않았을 때, 변조 깊이와 relaxation-oscillation 주파수는 약 5 GHz , 3 GHz 로 측정된 결과와 매우 근접한 값을 보이고 있다. SSGDBR 레이저 다이오드의 동적 특성은 더 높은 거울 반사율로 인하여 변조 깊이와 relaxation-oscillation 주파수가 더 높다는 점을 제외하고는, SGDBR 레이저 다이오드와 유사함을 볼 수 있다. 선풍증가인자는 처핑의 양에는 상대적으로 큰 영향을 미치지 않지만, 그림 3 에 보인 경향에는 거의 영향을 주지 않는다. 그림 3(a) 와 3(b) 의 두 경우에서, 다른 발진 파장의 변조 응답은 반사기에 굴절율변화가 없을 때의 발진파장과 같은 경향을 보인다. 주변모드는 레이저 다이오드가 문턱전류 근처에서 변조될 때 생긴다. 그러나 그 양은 매우 작고, 동적, 정적 모두 주변모드 억제비(side-mode suppression ratio)는 30 dB 이상을 유지하고 있다.

IV. 전계흡수변조기가 집적된 SGDBR 레이저 다이오드

본 장에서는, 전계흡수변조기가 외부집적된 광대역 파장가변 레이저 다이오드의 강도변조 특성을 조사한다. 직접변조와 외부변조를 하는 경우의 처핑 발생량을 서로 비교하여 외부변조의 장점을 보였다. 그리고 외부 전계흡수변조기를 정현신호로 구동함으로써 짧은 폭 펄스열을 생성시킬 수 있음을 확인하였다.

그림 4는 외부 변조기가 집적된 SGDBR 레이저 다이오드의 개략도이다. 여기에서 외부 변조기는 DC 바이어스 전압과 고주파수(HF) 신호에 의하여 구동되

는 전계흡수변조기이다. 강도변조는 집적된 전계흡수 변조기에서의 양자구속슈타르크효과(quantum confined Stark effect)를 이용하고 있다. 계산에 사용된 변조기의 바이어스 전압에 대한 흡수도와 굴절율변화는 그림 5 와 같다^[15]. 동작파장은 1.544 μm 주변이고, 흡수도와 굴절율변화는 각각 역바이어스 전압(V)의 함수로 주어지는 4 차 다항식으로 근사화되어진다.

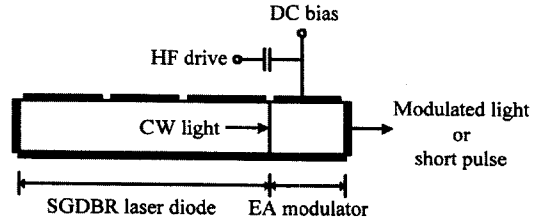


그림 4. 외부 전계흡수변조기가 집적된 SGDBR 레이저 다이오드의 개략도

Fig. 4. Schematic diagram of a SGDBR laser diode integrated with an external electroabsorption modulator.

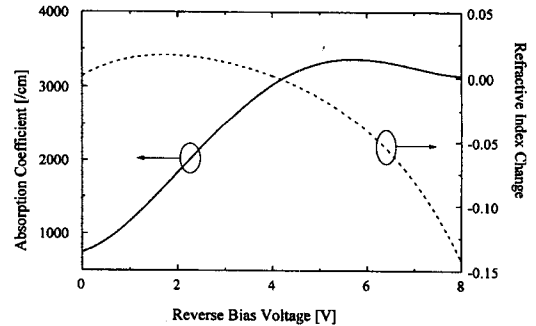


그림 5. 전계흡수변조기의 흡수도와 굴절율변화
Fig. 5. The absorption coefficient and refractive index change of an electroabsorption modulator.

활성영역과 SGDBR로 이루어진 레이징 영역이 문턱전류 이하에서 동작할 때, 즉 빛을 방출하고 있지 않을 때는, 외부변조기는 4 V 바이어스로 걸려져 있어 상당히 큰 흡수도를 보인다. 그러다가 레이징 영역이 안정된 발진을 하게 된 후에, 변조기에 인가된 전압을 4 V 에서 0 V 까지 5 Gbps 의 반복율로 변조하게 된다. 구형파로 단순하게 변조하기보다, 좀 더 현실적인 계산을 하기 위하여 시정수, $\tau = (RC)^{-1}$ 가 25 ps 인 간단한 기생망이 해석에 사용된다.

그림 6은 강도변조 동안의 변조기로부터의 광출력과 주파수 처핑을 보이고 있다. 광출력은 5 Gbps 의 반

복음로 0 mW 에서 3.5 mW 로 스윙하고 있다. 이 때 광출력의 소멸비는 약 23 dB 이다.

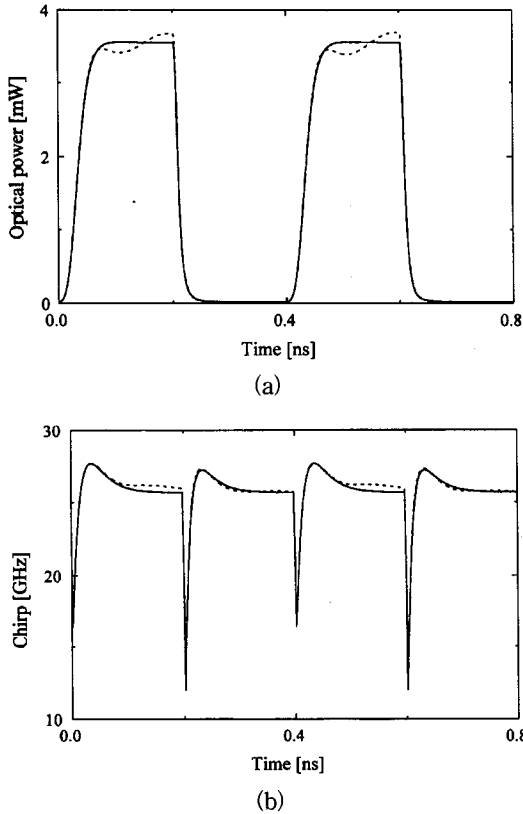


그림 6. 외부변조기 단면으로부터 출력되는 (a) 광펄스와 (b) 그것의 주파수 처핑
 Fig. 6. (a) Optical pulse emitted from the facet of an external modulator and (b) its frequency chirping.

그림 6(a)에 나타나 있듯이, 변조기가 꺼지고 켜짐에 따라, 변조기의 전력반사율이 0.0 % 일때의 광출력은 시정수에 상응하는 상승시간(rising time)을 가지고 변화하지만, 반사율이 0.1 % 인 경우의 광출력은 약간의 요동을 갖고 있는 것을 볼 수 있는데, 이것은 변조기 단면으로부터 궤환된 빛이 활성영역의 레이징에 영향을 미치기 때문이다. 그림 6(b)에서는 광출력의 주파수 처핑을 순간 주파수,

$$\omega(t) = \frac{d\phi_{out}}{dt} = \text{Im}\{\ln(E_{out})\} \quad (11)$$

로부터 계산될 수 있는데, 여기에서 E_{out} 과 ϕ_{out} 는 변조기로부터 출력되는 복소 광전계와 그것의 위상출력이다. $\text{Im}\{ \}$ 는 복소수의 허수부분을 나타낸다. 일

반적으로, 식 (11) 로부터 계산된 $\omega(t)$ 는 활성영역의 자발방출 잡음으로 인한 요동이 매우 심하여 명확한 값을 구하기 어렵다. 그러나, 레이징 영역이 안정화되고 난 후에는, 유도방출이 우세하여지므로, 단순히 자발방출을 무시함으로써 잡음이 없는 $\omega(t)$ 를 구할 수 있다. 처핑에서 보여지는 스파이크는 전계흡수 변조기의 굴절율변화에 기인되는 것이다. 위에서 설명되었듯이, $\Delta n(t)$ 는 역바이어스 전압의 함수이므로, 역바이어스 전압의 "on/off" 변조시에 단위시간당 굴절율변화는 급격하게 된다. 스파이크에서 "on" 과 "off" 일 때 서로 다른 피크를 보이는 것은 전압에 따른 굴절율변화가 비선형적이기 때문이다. 200 ps 의 펄스폭에 비하여 스파이크의 점유시간이 10 분의 1 보다 작으므로, 스파이크는 평균 주파수 처핑에는 크게 영향을 주지는 않는다는 것을 알 수 있다. 그림 6(b) 에서 보여지듯이, 변조기 단면의 전력반사율이 0.0 % 일 때, "on" 과 "off" 상태간에 주파수 처핑이 없고, 전력반사율이 0.1 % 일때는 수백 MHz 정도의 주파수 천이가 발생하고 있다. 이것은 변조기 단면에서의 궤환광으로 인한 것으로, 그림 6(a) 에서 보여진 광출력의 요동도 이것에 의한 것이다. 이때 외부변조기 단면의 전력반사율의 위상은 0° 이다.

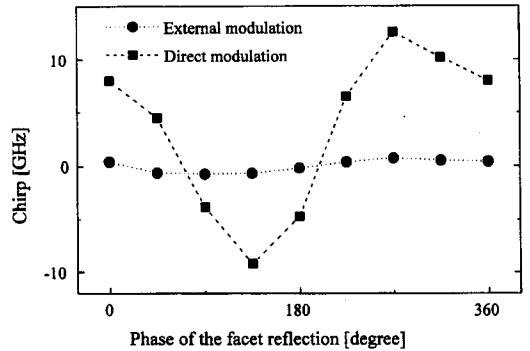


그림 7. 외부변조와 직접변조의 주파수 처핑의 비교
 Fig. 7. Comparison of frequency chirpings between the external modulation and the direct modulation.

그림 7은 레이저 다이오드의 외부변조와 직접변조간의 주파수 처핑을 비교하고 있다. 외부변조의 주파수 처핑은 그림 6을 구한 해석에서 사용된 방법과 같다. 변조기 단면의 광전력 반사율은 0.1 % 이다. 직접 변조에서, 광전력이 안정화 되고 난 후에, 활성영역으로 주입되는 전류를 5 Gbps 로 변조하는데, 그 세기

는 광출력의 소멸비가 20 dB 가 되도록 조절된다. 0° 부터 360° 까지의 변조기 단면의 위상에 대하여, 외부변조의 주파수 처핑은 -0.7 에서 0.4 GHz 로 변하고, 직접변조는 -9.2 에서 12.6 GHz 의 변화가 있다. 이로부터 외부변조의 주파수 처핑의 변화량이 직접변조보다 20 분의 1 가량 더 적음을 알 수 있다.

연속파 발진 레이저 다이오드에 외부 전계흡수변조기를 집적한 구조에서, 전계흡수변조기를 정현신호로 구동함으로써 짧은 폭 펄스열을 생성할 수 있다. 그림 8 에서는 생성된 펄스와 솔리톤의 파형을 비교하고 있다. 변조기에 인가되는 역바이어스 전압은 4 V 이고, HF 구동원의 진폭과 주파수는 각각 4 V, 30 GHz 이다. 레이징 영역으로부터의 연속 광파는 외부변조기의 흡수도의 변화에 의하여 광게이팅 되어진다. 그림 8 에서 보여지듯이 생성된 펄스는 솔리톤의 파형인 $\text{sech}^2(\tau)$ 에 잘 교정되어지고 있다. 생성된 펄스의 반복율은 30 Gbps 이고, $\Delta\tau$ 와 $\Delta\nu$ 는 각각 2.294 ps, 182 GHz 이다. 시간-대역폭 곱은 0.418 로, 이는 생성된 펄스가 거의 변환제한(transform-limited) 되어져 있다는 것을 나타낸다.

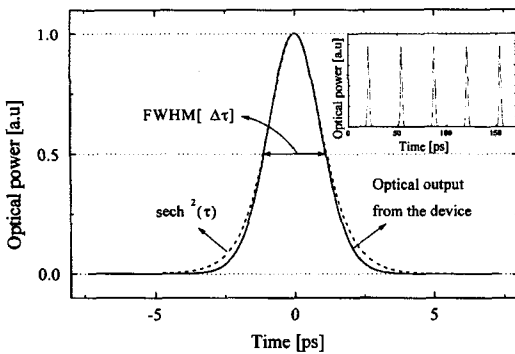


그림 8. 생성된 펄스열(삽입도)과 그것의 솔리톤과의 비교
 Fig. 8. The generated optical pulse train(inset) and its comparison to the soliton.

V. 결론

전계흡수변조기가 집적된 광대역 파장가변 SGDBR/SSGDBR 레이저 다이오드의 동적특성을 개선된 대신호 시영역 모델을 이용하여 조사하였다. 이 모델은 수동영역의 비교적 큰 굴절율변화에 기인되어 광대역 파장가변을 하는 복합 레이저 다이오드의 해석에 매우 유용하다. 우선 개선된 대신호 시영역 모델을 이용하

여 SGDBR 레이저 다이오드와 SSGDBR 레이저 다이오드의 광대역 동적 파장가변 특성을 조사하고, 전계흡수변조기가 집적된 SGDBR 레이저 다이오드의 강도변조 특성을 해석하였다. 외부변조를 할 때의 주파수 처핑량이 직접변조보다 20 분의 1 정도로 매우 작다는 것을 밝히고, 전계흡수변조기의 광게이팅 특성을 이용하여 변환제한된(transform-limited) 펄스열을 생성할 수 있음을 보였다. 이러한 결과로부터 전계흡수변조기가 집적된 SGDBR/SSGDBR 레이저 다이오드로부터 광대역으로 파장가변되는 솔리톤을 생성할 수 있음을 기대할 수 있다.

참고 문헌

[1] M. S. Borella, J. P. Jue, D. Banerjee, B. Ramamurthy, and B. Mukherjee, "Optical components for WDM lightwave networks," *Proc. IEEE*, vol. 85, no. 8, pp. 1274-1307, 1997.

[2] P. E. Green, *Fiber Optic Networks*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1993.

[3] S. L. Lee, D. A. Tauber, V. Jayaraman, M. E. Heimbuch, L. A. Coldren, and J. E. Bowers, "Dynamic responses of widely tunable sampled grating DBR lasers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 8, no. 12, pp. 1597-1599, 1996.

[4] 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.*, vol. 29, no. 6, pp. 1824-1834, 1993.

[5] C. K. Gardiner, R. G. S. Plumb, P. J. Williams, and T. J. Reid, "Three-section sampled-grating DBR lasers: modelling and measurements," *IEE Proc.-Optoelectron.*, vol. 143, no. 1, pp. 24-30, 1996.

[6] F. Kano, H. Ishii, Y. Tohmori, and Y. Yoshikuni, "Characteristics of super structure grating(SSG) DBR lasers under broad range wavelength tuning," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 5, no. 6, pp. 611-613, 1993.

[7] H. Ishii, H. Tanobe, F. Kano, Y. Tohmori,

- Y. Kondo, and Y. Yoshikuni, "Quasi-continuous wavelength tuning in superstructure grating(SSG) DBR lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 32, no. 3, pp. 433-441, 1996.
- [8] 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. Tech. Lett.*, vol. 10, no. 1, pp. 39-41, 1998.
- [9] 김병성, 정영철, 김선호, "외부변조기가 집적된 광대역 파장가변 DBR 레이저다이오드의 특성에 관한 연구," *전자공학회논문지*, 제 33 권, A 편, 제 8 호, pp. 174-185, 1996
- [10] K. Wakita, K. Sato, I. Kotaka, M. Yamamoto, and M. Asobe, "Transform-limited 7-ps optical pulse generation using a sinusoidally driven InGaAsP/InGaAsP strained multiple-quantum-well DFB laser/modulator monolithically integrated light source," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 5, pp. 899-901, 1993.
- [11] K. Sato, K. Wakita, I. Kotaka, Y. Kondo, and M. Yamamoto, "Multisection electroabsorption modulators integrated with distributed feedback lasers for pulse generation coded at 10 Gbit/s," *Electron. Lett.*, vol. 30, no. 14, pp. 1144-1145, 1994.
- [12] K. Petermann, "Calculated spontaneous emission factor for double heterostructure injection lasers with gain induced mode guiding," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-15, pp. 556-570, 1979.
- [13] 김수현, 김병성, 정영철, 김선호, "SSGDBR 레이저 다이오드에서의 광대역 파장변환 모델링," *Photonics Conference '97*, pp. 295-296, 1997
- [14] D. J. Jones, L. M. Zhang, J. E. Carroll and D. D. Marcenac, "Dynamics of monolithic passively mode-locked semiconductor lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 31, pp. 1051-1058, 1995.
- [15] L. M. Zhang and J. E. Carroll, "Semiconductor 1.55 μm Laser Source with Gigabit/Second Integrated Electroabsorptive Modulator," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 30, pp. 2537-2577, 1994.

 저 자 소 개

金 炳 星(正會員) 第 33卷 A編 第 8號 參照
 현재 광운대학교 전자통신공학과 박사과정

鄭 榮 哲(正會員) 第 33卷 A編 第 8號 參照
 현재 광운대학교 전자공학부/전자통신공학과 부교수

金 善 鎬(正會員) 第 32卷 第 1號 參照
 현재 한국과학기술연구원 광기술연구센터 책임연구원