

論文 2002-39SD-8-1

다전극 DFB-LD의 광 쌍안정 특성에 관한 연구

(A Study on the Optical Bistable Characteristic of a Multi-Section DFB-LD)

金 根 徹 *, 鄭 榮 哲 *

(Geunchul Kim and Youngchul Chung)

요 약

다전극 DFB-LD는 외부에서 주입되는 광의 파워에 따라서 발진하는 광출력이 쌍안정성을 보임에 따라, 이를 파장 변환에 활용하거나, 광논리 소자로 활용할 수 있는 가능성이 있다. 본 논문에서는 연산자 분리 시 영역 모델을 이용하여 다전극 DFB-LD에서의 광 쌍안정 특성에 대하여 연구하였다. 다전극 DFB-LD에 불균등하게 전류를 인가하여 쌍안정 현상이 발생함을 확인하고, 흡수 영역으로 입력광을 입사하였을 때 발생하는 출력광 파워의 쌍안정 현상도 확인하였다. 그리고 수 ns의 스위칭 시간과 수 pJ의 스위칭 에너지를 가진 set 또는 reset 광 펄스의 인가에 의하여 flip-flop 특성을 보임에 따라 광 메모리 소자로서의 동작도 확인하였다. 또한 캐리어 생존시간과 이득 곡선 기울기 등의 조절로서 LD 광 출력의 반응 시간을 줄일 수 있는 가능성을 확인하였다.

Abstract

A multi-section DFB-LD shows optical bistability subject to externally injected light signal, then it has potential applications such as wavelength conversion and optical logic gates. In this paper, we have studied the optical bistability in multi-section DFB-LD using split-step time-domain model. It is confirmed that the multi-section DFB-LD, which is excited inhomogeneously, shows bistability. The optical bistable characteristics are investigated when input light is injected into a absorptive region. Simulation results show that multi-section DFB-LD works as a flip-flop depending on the set-reset optical pulse which has a few ns in switching time and a few pJ in switching energy, so that it can act as a optical logic device. Besides, if we change the carrier lifetime and the differential gain coefficient, it is expected that the response time of optical output signal can be reduced.

Key Words : Optical bistability, DFB-LD, saturable absorber, bistable laser diode, flip-flop, split-step time-domain modeling

* 正會員, 光云大學校 電子通信工學科

(Dept. of Electronic Communications Engineering, Kwangwoon University)

※ 이 연구는 과학기술부 중점국가연구개발사업 중 차세대포토닉스기술개발사업의 지원과 한국과학재단 특정연구과제(R01-2001-00288)의 지원에 의하여 수행되었음.

接受日字:2002年2月21日, 수정완료일:2002年6月25日

I. 서 론

광스위칭 시스템과 광컴퓨터 시스템에 대한 관심은 대용량 광통신 시스템의 실용화와 더불어 점차적으로 증대되고 있다. 광 쌍안정(optical bistability)이란 하나의 입력에 대해 두 가지의 안정된 출력을 가지는 것을 말한다. 쌍안정 LD는 큰 광 이득으로 인하여 스위칭

에너지가 작고, on/off 비가 크다는 장점을 가지고 있다. 다전극(multi-section) DFB-LD(Distributed Feedback Laser Diode)는 동작 조건에 따라 일정한 전류를 인가함에도 불구하고 쌍안정, self-pulsation 뿐만 아니라 모드 잠금 특성까지 나타낸다.^[1] 외부에서 주입되는 광의 파워에 따라서 발전하는 광 출력이 쌍안정성을 보이는 것을 파장변환에 활용하거나, 광 논리 소자로 활용할 수 있는 가능성이 있다.^[2] 쌍안정 레이저는 앞으로의 광통신 네트워크와 광컴퓨터 시스템에 있어 전광 스위칭 소자로서 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.^[3] 반도체 레이저에 불균등적으로 전류를 인가하여 얻는 흡수(absorptive) 쌍안정은 광컴퓨터 시스템에 응용하기 위해 Lasher가 처음으로 제안하였다.^[4] 그러나 광통신 시스템에서 응용할 수 있는 분야가 늘어나면서 쌍안정 레이저에 대한 관심이 점차 증가하고 있다. 쌍안정 레이저의 응용 분야로 전광(all-optical) 파장 변환,^[5] 재생(regeneration),^[6] 논리(logic),^[7] 파형 왜곡에 대한 보상(waveform distortion compensation),^[8] RZ/NRZ 데이터 전송,^[9] 그리고 역다중화^[10] 등의 결과들이 발표되었으며, 반도체 레이저의 비선형성에 대한 더 많은 연구가 진행되고 있다.

광 쌍안정 레이저의 여러 응용분야 중에서 전광 set-reset 동작은 가장 기본적인 기능 중 하나이다. 단일 파장의 빛을 입력으로 이용한 전광 set-reset 동작이 페브리-페롯 형식의 쌍안정 레이저에서 구현되었다.^[11] 또한 side-light-injection MQW 쌍안정 레이저,^[12] InGaAsP 도파로 쌍안정 소자,^[13] coupled 레이저^[14] 등의 여러 타입의 쌍안정 소자에서도 set-reset 동작이 보고된 바 있다.

본 논문은 Multi-section DFB-LD에서의 광 쌍안정 특성을 연산자 분리 시영역 모델로 시뮬레이션 하여 특성을 알아보았다. 세 영역으로 나눈 DFB-LD의 좌측 영역을 포화흡수기로 사용하며 여기에 외부로부터의 광파워의 주입을 한다. 먼저 가운데 영역과 우측 영역에 주입되는 전류의 변화에 따른 쌍안정 현상을 살펴보고, 이를 토대로 외부에서 주입되는 광에 의한 광 쌍안정 현상을 살펴보았다. 외부에서 광펄스를 주입하여 flip-flop 동작을 시뮬레이션 하였다. 그리고 전류 대 광 출력 파워, 입력 광 대 출력 광 파워의 특성을 여러 파라미터 값에 대해 살펴보았다. 캐리어 생존시간과 이득 곡선 기울기를 조절하여 특성을 향상시킬 수 있었고 1.2 ns의 스위칭 시간과 2.4 pJ의 적은 스위칭 에너지

로도 안정된 flip-flop 특성을 얻을 수 있었다.

II. 기본원리

광 쌍안정이란 그림 1에 보여진 바와 같이 하나의 입력에 대하여 두 가지의 안정된 출력을 갖는 현상을 말한다. 이러한 광 입력-출력 특성을 이용하여 광 메모리, 광 리미터, 차등 증폭기, 그리고 광 스위치와 논리 소자 등에 이용할 수 있다.

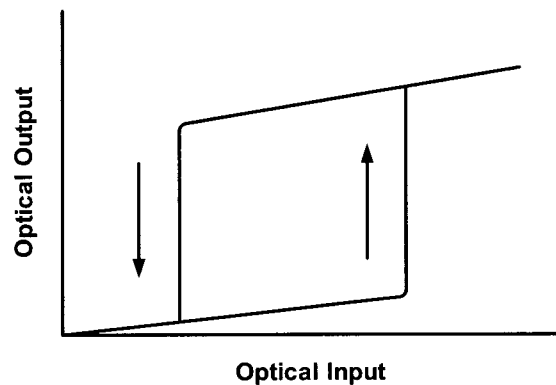


그림 1. 광 쌍안정 소자의 전형적인 출력 특성.

Fig. 1. Typical output characteristic of bistable optical device.

1. 광 이득

능동 영역에서 캐리어는 물질의 광특성을 변화시키고, 충분한 캐리어 밀도가 있는 경우 이득도 얻을 수 있다. 밀도 반전(population inversion)이 일어나고 전자와 정공이 능동 영역으로 주입되는 것에 의하여 이득이 발생한다.

반도체는 낮은 에너지를 갖는 광자에 대해서는 투명하지만 광자 에너지가 밴드갭(band gap)보다 클 경우 매우 높은 흡수가 일어난다. 캐리어 밀도가 증가함에 따라 이득을 얻을 수 있는 광자 에너지 범위가 나타나게 된다. 즉, 이득은 광자 에너지가 능동 영역의 밴드갭보다 크며 페르미 레벨(Fermi level)의 간격보다 작은 경우에 발생한다.

반도체 레이저는 다른 타입의 레이저보다 훨씬 높은 이득값을 갖는다. 이와 같이 이득값이 높기 때문에 반도체 레이저는 1 mm도 안되게 작게 만들 수 있는 장점을 갖는다. 이득은 캐리어 밀도 N 에 비례하고 다음과 같이 선형적으로 근사화 하여 나타낼 수 있다.

$$g = a(N - N_0) \tag{1}$$

2. 흡수 쌍안정

흡수 쌍안정은 다전극 레이저에 불균등한 전류를 인가할 때 전류 대 광 출력 파워, 입력 광 파워 대 출력 광 파워의 형태로 나타난다. 이것은 캐리어를 주입하지 않은 영역이 포화 흡수기(saturable absorber)로서 작용하기 때문이다.

다전극 레이저에선 쌍안정 뿐만 아니라 self-pulsation도 나타나는데 이 두 현상은 레이저 전체에 걸친 캐리어 생존시간과 관련이 있다. 레이저 전체에 걸쳐 캐리어 생존시간이 일정하면 쌍안정 출력 특성을 보인다. 흡수 영역에 전류를 주입하지 않거나 혹은 약간의 전류만 인가하였을 때 그 영역은 포화 흡수기로 작용하며 전류 대 광 출력 파워와 입력 광 파워 대 출력 광 파워는 쌍안정 커브를 그린다.

일반적인 전류 대 광 출력이 나타내는 hysteresis loop를 그림 2(a)에 보였다. 포화 흡수기에 주입되는 전류의 증가는 쌍안정을 발생시키는 전류 범위를 감소시킨다. 그림 2(b)는 바이어스 전류를 turn-off 문턱값의 바로 밑의 값으로 주었을 때 포화 흡수기로 입사되는 입력 광 파워에 의한 출력 광 파워의 쌍안정을 나타낸다. 바이어스 전류를 증가시키면 쌍안정을 일으킬 수 있는 입력 광 파워의 범위가 증가한다. 쌍안정 레이저는 쌍안정을 일으키는 범위 내의 바이어스 전류를 인

가할 경우 입력 광 파워가 주입되면 광 출력이 나타난다. 그리고 입력 광 파워가 제거된 후에도 쌍안정 레이저는 on 상태의 광 출력 파워를 낸다. 이것은 쌍안정 레이저가 광 메모리 소자로 사용될 수 있는 가능성을 보여주고 있다.^[15] 광 스위칭 파워가 입력 광 파장에 따라 차이가 있지만 흡수 쌍안정 레이저는 분산 쌍안정 레이저보다 더 넓은 입력 파장에 대한 tolerance를 갖는다는 장점이 있다.

III. 다전극 DFB-LD의 연산자 분리 시영역 모델링

본 장에서는 광 쌍안정 소자의 컴퓨터 모델로 제안된 연산자 분리 시영역 모델(time-domain model)에 관하여 기술하고 광 쌍안정 특성 해석을 하기 위해 시영역 모델을 어떻게 적용 시켰는지에 대해서 살펴보도록 한다. 연산자 분리 시영역 모델은 광도파로를 따라 전파하는 순방향 전파와 역방향 전파의 움직임을 나타내는 시간의존 결합 파동 방정식과 캐리어와 광자의 상관관계를 나타내는 윌 방정식(rate equation)에 기초하여 구성된다. 연산자 분리 시영역 모델은 레이저 물질 고유의 파라미터와 레이저 구조 변화의 영향을 매우 쉽게 고려할 수 있다.^[16]

1. 연산자 분리 시영역 모델

연산자 분리 개념을 이용한 시영역 모델은 다전극 DFB-LD에서 나타나는 광 쌍안정 특성을 정확히 시뮬레이션 할 수 있다. 광 도파로 내에서 전파하는 광파는

$$E(x, y, z, t) = \phi(x, y)[F(z, t)e^{-i\beta_0 z} + R(z, t)e^{i\beta_0 z}]e^{i\omega_0 t} \tag{2}$$

와 같이 표현될 수 있다. 여기서 $\phi(x, y)$ 는 도파로의 모드 함수이고, $F(z, t)$ 와 $R(z, t)$ 는 각각 순방향 전파와 역방향 전파이다. ω_0 는 시간축에 대응하는 중심 주파수이고, β_0 는 브래그(Bragg) 주파수에서의 공간 전파 상수를 나타낸다. 그리고 도파로를 전파하는 광파는 맥스웰 방정식,

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)E = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}(\epsilon E) \tag{3}$$

을 만족해야 한다. 여기서, c 는 진공 상태에서의 광속도이고, ϵ 은 활성층 물질의 유전율이다. 브래그 격자가 있는 구조의 도파로에 대한 시간의존 결합 파동 방정

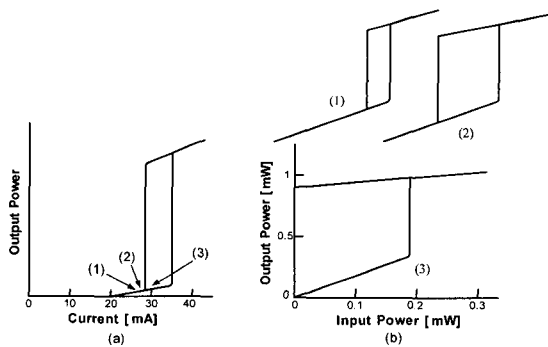


그림 2. 쌍안정 특성. (a) 전류 대 광 출력 커브, (b) (1)부터 (3)까지의 바이어스 전류에 대한 광 파워 대 출력 광 커브

Fig. 2. Schematic diagrams of bistable characteristic. (a) current vs. optical output curve, (b) input optical power vs. output optical power curve for bias current from (1) to (3).

식은 (2)와 (3)으로부터

$$\frac{1}{c_g} \frac{\partial F(z, t)}{\partial t} + \frac{\partial F(z, t)}{\partial z} = (g - i\delta - \alpha_0/2 - \Gamma\alpha_e/2)F(z, t) + ixR(z, t) + S_f(z, t) \quad (4.a)$$

$$\frac{1}{c_g} \frac{\partial R(z, t)}{\partial t} - \frac{\partial R(z, t)}{\partial z} = (g - i\delta - \alpha_0/2 - \Gamma\alpha_e/2)R(z, t) + ix^*F(z, t) + S_r(z, t) \quad (4.b)$$

와 같이 구할 수 있다. 여기서 c_g 는 군속도(group velocity)로 임의의 주파수에서 일정하다고 가정된다. g 는 이득이고, α_0 는 도파로 내에서 흡수와 산란 등에 의해 선천적으로 발생하는 손실 계수이고, α_e 는 전계 흡수 변조기 등에서 의도적으로 발생시키는 손실 계수이다. x 는 한 방향 전파가 다른 전파 방향으로 결합되어지는 정도를 나타내는 결합 계수(coupling coefficient)이다. Γ 는 광도파로에서 광파가 활성층(active layer)에 얼마나 중첩되어 있는가를 나타내는 구속 인자이다. 그리고 S_f 와 S_r 은 자발 방출 잡음(spontaneous emission noise)을 나타내는 파라미터로, 레이저 발진시에 구동원으로 작동한다. S_f 와 S_r 은 서로 크기는 같지만, 위상은 랜덤하게 변하는 가우시안(Gaussian) 분포를 갖는다.

광파는 광도파로를 진행하면서 이득을 얻게 된다. 이득은 캐리어 밀도의 함수로서 직선 함수로 간단히 근사화 될 수 있다. 시간영역 모델에서 이득은 캐리어 밀도의 함수로,

$$g(z, t) = \frac{\Gamma g_N(N(z, t) - N_0)}{2(1 + \epsilon P)} \quad (5)$$

로 쓸 수 있다. 여기서, g_N 은 캐리어 밀도 변화량에 대응하여 이득이 변화하는 정도를 나타내는 미분 이득(differential gain)이다. N_0 는 투명(transparency) 캐리어 밀도, P 는 광자 밀도, ϵ 은 이득 억제 계수로 이득과 광자 밀도와의 비선형 관계를 표현한다.

식 (4)에서 δ 는 레이저의 중심 파장이 브래그 조건(Bragg condition)으로부터 얼마나 벗어나 있는지를 나타내는 벗어남 인자(detuning factor)로, 광도파로의 굴절률 변화로부터 기인되어진다. 시간영역에서 벗어남 인자는

$$\delta = \frac{\omega_0}{c} (n_{eff,0} + \Delta n) - \frac{\pi}{\Lambda} \quad (6)$$

와 같이 정의된다. 여기서, $n_{eff,0}$ 는 캐리어 밀도가 투명점(transparency) 근처에 있을 때의 굴절률이다. Δn 은 굴절률의 변화량으로, 광도파로에 캐리어가 주입될 때에는 음의 값을 보이고, 광도파로가 가열되었을 때에는 양의 값을 보인다.

시간의존 결합 파동 방정식 (4)에서, x 와 x^* 는 레이어 공진기 내에 분포된 격자(grating)에 의하여 발생하는 결합을 나타내는 파라미터이다. 격자는 굴절률의 주기적인 변화뿐만 아니라, 이득의 주기적인 변화에 의해서도 발생된다. 전체 결합 계수는 $x = x_i + ix_g$ 로 쓸 수 있다.

시간의존 결합 파동방정식에 있는 파라미터의 값은 캐리어 밀도의 시간과 공간 변화의 주도로 변하게 되는데, 이러한 시간에 따른 캐리어 밀도의 율 방정식으로 다음과 같이 표현되어질 수 있다.

$$\frac{dN}{dt} = \frac{J}{ed} - BN^2 - CN^3 - \frac{c_g g_N (N - N_0)}{1 + \epsilon P} P \quad (9)$$

여기서 J 는 전류 주입 밀도[A/cm²], e 는 전하량, d 는 활성층의 두께, C 는 오제 캐리어 재결합 계수이다. $P = |F|^2 + |R|^2$ 는 정규화된 광자 밀도이다. 공간 전파에 따른 캐리어 밀도의 변화와 그에 따른 파라미터들의 변화는 결합 파동방정식을 전산화한 시단계 알고리즘으로부터 구한다.

광도파로 소자 내부에서 광파의 진행과 함께, 광파의 변화는 그림 3과 같이 추적할 수 있다. 레이저는 일정한 간격으로 나누어지고 각각의 영역에는 순방향 광파, 역방향 광파, 캐리어 등의 변수들과 영역 고유의 파라미터들이 있다. 임의의 공간과 시간에서 다음 공간과 시간의 광파를 구하는 과정은 순방향으로 진행되는 광파의 경우는 $t + \Delta t$ 일 때 $z + \Delta z$ 의 값을 구하게 된다. 이 때의 값은 $F(z, t)$ 와 $R(z, t)$ 의 값을 이용하여 구하게 된다. 반면에 역방향으로 진행되는 광파는 $t + \Delta t$ 일 때 $z - \Delta z$ 의 값을 구하게 된다. 이 때에도 역시 $F(z, t)$ 와 $R(z, t)$ 의 값을 이용하게 된다. 광도파로 소자의 단면에서는 단면반사율에 의한 경계조건(boundary conditions)을 만족하여야 한다. 순방향 전파와 역방향 전파에 대한 경계 조건은

$$F(0, t) = r_L R(0, t) \quad (10.a)$$

$$R(L_{tot}, t) = r_R F(L_{tot}, t) \quad (10.b)$$

로 주어진다. 광도파로 소자 내부를 전파해 나가는 광파는 반드시 경계조건을 만족하여야 한다.

레이저 공진기 내에서는, 공간적으로 일정한 주입전류를 인가한다고 해도, 공진기 내에서 발생된 광전력은 매 시간 단계마다 그리고 위치에 따라 다르게 된다. 따라서 율 방정식에 의하여, 서로 다른 광전력은 그에 따른 캐리어 밀도 변화를 가져오게 되고, 이것은 다시 전계 이득에 영향을 준다. 다시 말해서, 소자 내에서의 시간과 위치에 대한 광전력, 캐리어 밀도, 전계 이득 등의 파라미터들은 서로 유기적인 관계를 가지고 있으며, 대신호 시영역 모델은 이러한 관계를 모델링 하는데 매우 유용하다.

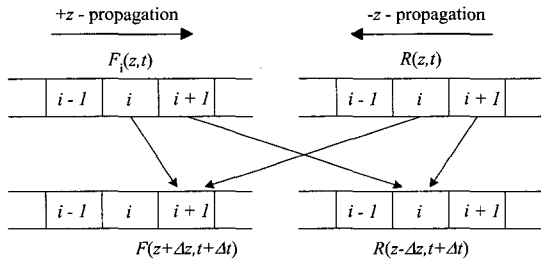


그림 3. 광파의 움직임과 캐리어 밀도의 추적도
Fig. 3. Tracing diagram of optical field motion and carrier density.

전 시간과 공간에서의 광파의 값으로부터 현 시간에서의 광파의 값을 계산하는 방법에는 시간의존 결합 파동방정식을 시간단계(time-stepped) 알고리즘으로 전산화 하는 방법에 따라 여러 가지가 있다. 시간의존 결합 파동방정식은 광도파로를 일정한 길이 $\Delta z (= c_g \Delta t)$ 를 갖는 섹션들로 나누어, 각각의 영역에 대하여 결합 파동방정식의 해를 구함으로써 시간단계 알고리즘으로 변환되어질 수 있다. 또 알고리즘의 구현에서, 시간의존 결합 파동방정식은 연산자 분리 개념을 사용하여 전산화되어 진다.^[16]

2. 시영역 모델의 적용

다전극 DFB-LD에서 나타나는 광 쌍안정 특성을 해석하기 위하여 연산자 분리 시영역 모델을 적용하여 보았다. 그림 4에 보여지는 다전극 DFB-LD의 좌측 영역은 흡수기로 사용되는 영역으로서 전류를 가하지 않는다. 그리고 가운데 영역과 우측 영역에 인가되는 전류의 비는 3:2로 하였다. 바이어스를 걸어준 상태에서

입력광은 좌측 영역 즉, 흡수 영역으로 입사한다. 입력광의 파장은 1540 nm이고, 출력광 파장은 1550 nm정도이며, LD의 오른쪽 단면에서 측정되는 광 파워는 필터를 이용하여 입력광의 파장을 제거하였다. 양 단면은 AR(anti-reflection) 코팅하였다. 표 1은 시물레이션에 사용된 파라미터를 나타낸 것이다.

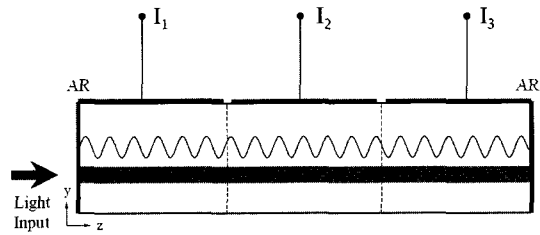


그림 4. 다전극 DFB-LD의 개략도
Fig. 4. Schematic diagram of a three-section DFB laser.

표 1. 다전극 DFB-LD의 파라미터.

Table 1. Parameters of a multi-section DFB-LD.

자발 재결합 계수, B	$0.2 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$
오제 캐리어 재결합 계수, C	$1.3 \times 10^{-28} \text{ cm}^6 \text{ s}^{-1}$
투명 캐리어 밀도, N_0	$1.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
실효 굴절률, n_g	4
활성층의 두께, d_{act}	0.2 μm
도파로 폭, w	2 μm
자발 결합 인자, β	0.1×10^{-4}
도파로 손실, α	20 cm^{-1}
선폭 증가 인자, a_m	5
도파로 구속 인자, Γ	0.3
비선형 이득 억제 계수, ϵ	$3 \times 10^{-17} \text{ cm}^3$

3. 쌍안정 특성

적당한 파라미터 값이 주어지면 다전극 DFB-LD로부터 쌍안정 특성을 얻을 수 있다. 그림 5는 캐리어 생존시간(τ)이 10 ns이고 이득 곡선 기울기(g_N)가 $2.5 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ 로 주어졌을 때 LD에 주어지는 전류 ($I_i = I_2 + I_3$)에 따른 광출력을 나타내고 있다. I_i 가 100 mA에서 120 mA 사이의 영역에서 쌍안정 현상이 발생함을 볼 수 있다. 전류가 증가할 때는 120 mA가 되어야 급격한 발진을 일으키고 그 뒤로는 선형적으로 출력 파워가 증가함을 볼 수 있다. 이 때 발진을 일으키

는 전류값을 turn-on 문턱값이라 한다. 하지만 그 상태에서 다시 전류를 감소시킬 때는 120 mA 밑으로 내려가도 선형적인 광출력을 보이다가 100 mA에 이르러서야 발진이 멈추는 것을 볼 수 있다. 이는 다전극 DFB-LD 내의 격자에 의한 광궤환(optical feedback)에 의해 turn-on 문턱값 아래에서도 발진할 수 있는 캐리어가 공급되기 때문이다. 발진을 멈추는 전류값을 turn-off 문턱값이라 한다.

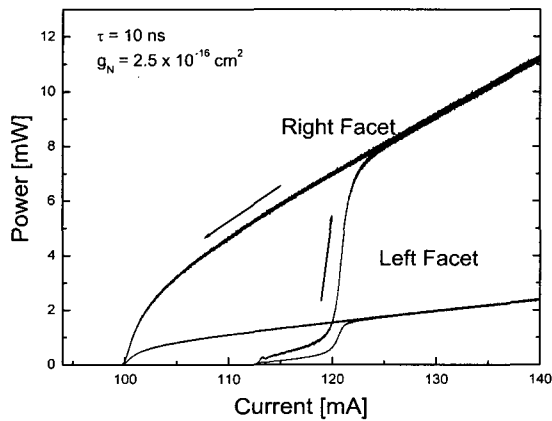
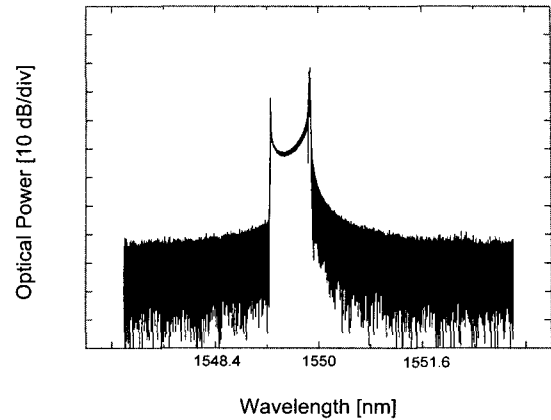


그림 5. 전류 I_t 에 대한 광 출력 파워.

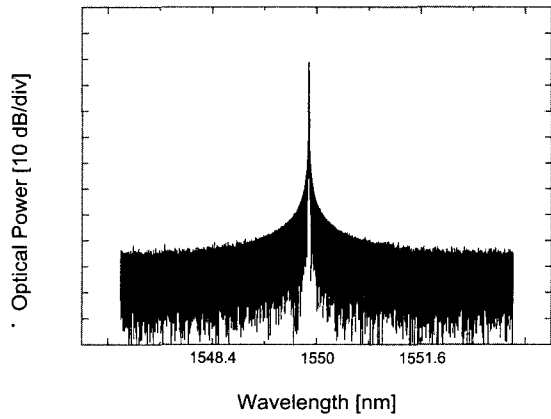
Fig. 5. Power as a function of current I_t .

그림 6은 그림 5에서 오른쪽 단면에서의 광 파워를 스펙트럼으로 나타낸 것이다. 그림 6(a)는 그림 5에서 쌍안정 현상이 발생하는 영역, 즉 I_t 가 100 mA에서 120 mA 사이의 스펙트럼이고, 6(b)는 쌍안정 현상이 없는 영역, 즉 I_t 가 120 mA 정도 이후에서의 스펙트럼이다.

그림 5에서 turn-off 문턱값은 약 100 mA 임을 볼 수 있다. 이 때 LD의 바이어스를 turn-off 문턱값보다 약간 적은 95 mA를 걸어준 다음 왼쪽 단면으로 입력 광을 입사하면 입력 광 파워에 따른 발진 광 파워의 쌍안정 현상을 볼 수 있게 된다. 그림 7은 95 mA의 바이어스를 걸어준 다음 입력 광을 0 mW부터 5 mW까지 증가한 뒤 다시 0 mW로 감소시키면서 발진 광 파워를 살펴 본 것이다. 입력 광의 파워가 2.8 mW가 되는 순간에 전극 1에서 입력 광의 흡수에 의하여, 투명해지면서 발진이 갑자기 발생함을 알 수 있다. 2.8 mW 이상의 입력 광 파워에서 1.3 mW 정도의 발진 광 파워를 유지하다, 입력 광 파워를 점차 감소시키면 입력 광 파워가 1.5 mW 이하에서 발진을 멈추게 된다. 그림 7에서 다



(a)



(b)

그림 6. 그림 5에서 오른쪽 단면으로부터의 스펙트럼. (a) 쌍안정 영역, (b) 쌍안정 이후의 안정된 영역

Fig. 6. Optical spectrum from right facet of Fig. 5. (a) bistable region, (b) stable region.

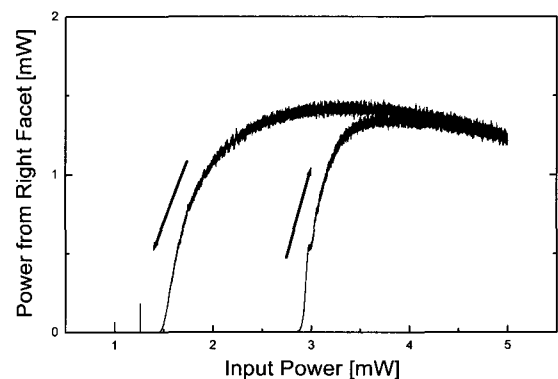


그림 7. 입력 광 파워 대 출력 광 파워. $I_t = 95 \text{ mA}$, $I_1 = 0 \text{ mA}$.

Fig. 7. Output optical power versus injection optical power. $I_t = 95 \text{ mA}$, $I_1 = 0 \text{ mA}$.

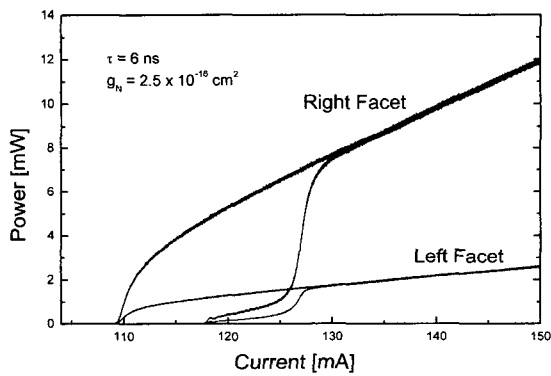
전극 DFB-LD는 광 쌍안정 소자로서 동작 가능성을 확인할 수 있었다.

4. 파라미터의 변화에 따른 쌍안정 특성 변화

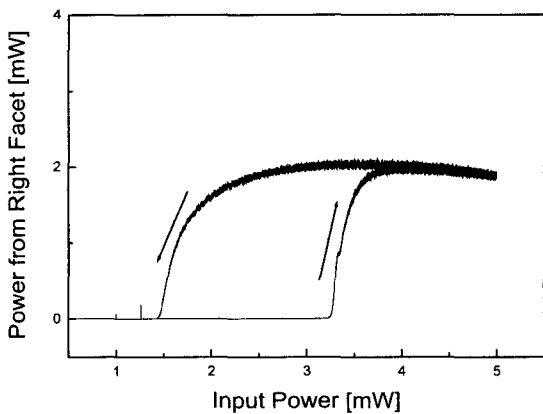
캐리어 생존시간과 이득 곡선 기울기 등을 조절함에 따라 쌍안정 특성도 변화하게 되고, 적당한 값들을 취해 줌으로서 LD 광출력의 반응 시간을 줄일 수 있다. 그림 8은 이득 곡선 기울기의 변화 없이 캐리어 생존시간을 6 ns로 했을 경우의 전류 대 광출력 특성과 입력광 파워 대 출력광 파워를 나타낸 것이다. 캐리어 생존시간의 감소로 인하여 그림 5와 비교하였을 때 문턱값이 다소 높아진 것을 볼 수 있다. 문턱값이 높아짐은 입력광에 대한 쌍안정 특성을 얻기 위한 바이어스 전류 값이 증가함을 뜻한다. 광 쌍안정 특성을 얻기 위해서는 바이어스 전류로 105 mA 정도를 인가하여야 한

다. 그림 8(b)는 105 mA의 바이어스를 걸어 준 상태에서 외부로부터의 입력광에 따른 출력에서의 광 쌍안정 현상을 나타낸 것이다.

이번엔 캐리어 생존시간을 10 ns로 유지하고 이득 곡선 기울기를 $3 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ 으로 증가시킨 다음 쌍안정 특성을 살펴 보았다. 이득 곡선 기울기가 증가하면 식 (5)에 따라 캐리어에 대한 반응이 빨라지게 되고 그만큼 이득이 증가하게 된다. 따라서 문턱값이 낮아짐을 그림 9(a)를 통해 알 수 있다. 문턱값이 낮아짐에 따라 광 쌍안정 현상을 얻기 위해 LD에 걸어주는 바이어스 전류는 85 mA 정도로 낮아지게 된다. 그림 9(b)는 입력광에 따른 출력광 쌍안정 현상을 나타내고 있다.



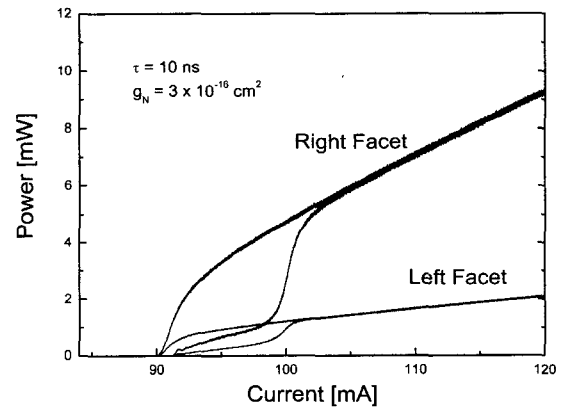
(a)



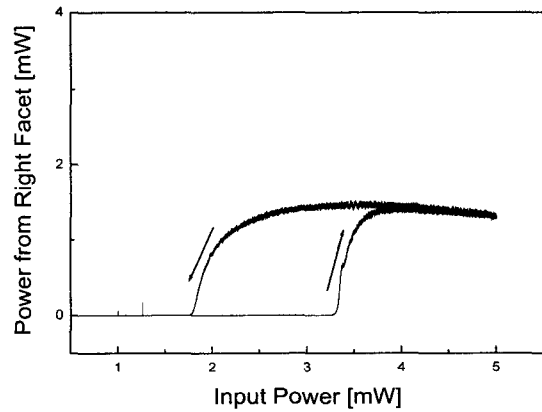
(b)

그림 8. (a) 전류 I_t 에 대한 광출력 파워, (b) 입력광 파워 대 출력광 파워

Fig. 8. (a) Power as a function of current I_t , (b) Output power versus injection optical power.



(a)



(b)

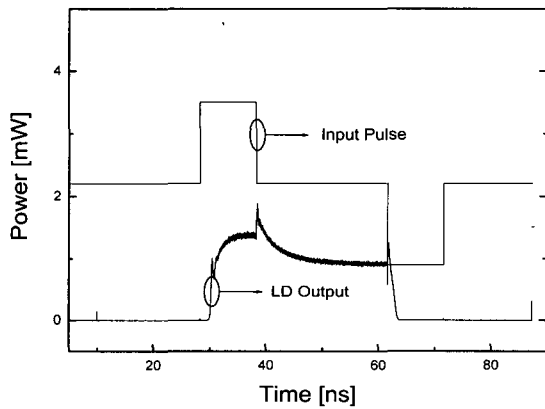
그림 9. (a) 전류 I_t 에 대한 광출력 파워, (b) 입력광 파워 대 출력광 파워

Fig. 9. (a) Power as a function of current I_t , (b) Output power versus injection optical power.

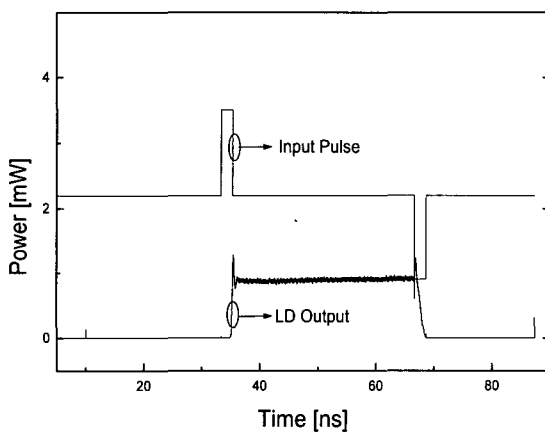
IV. 시뮬레이션을 통한 Flip-Flop 특성 해석

본 장에서는 광 쌍안정 소자로서 제안된 다전극 DFB-LD의 시영역 모델을 이용하여 광 메모리 소자로서 동작함을 확인하고 동적 특성을 해석하였다. 광 스위칭 시간과 광 스위칭 에너지에 따른 flip-flop 특성을 살펴보고 캐리어 생존시간과 이득 곡선 기울기의 변화에 따른 광 스위칭 시간과 광 스위칭 에너지의 문턱값을 제시하였다. 그리고 입력광 펄스가 이상적이지 않을 경우에 대한 flip-flop 특성도 살펴보았다.

1. 광 쌍안정 현상을 이용한 flip-flop 특성



(a)



(b)

그림 10. 입력광 펄스에 대한 출력광 파워의 set-reset 특성. (a) 10 ns, (b) 2 ns

Fig. 10. Set-reset characteristic of output power for input optical pulse. (a) 10 ns, (b) 2 ns.

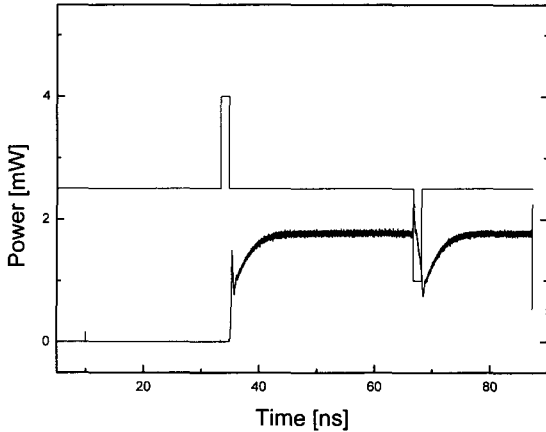
그림 7에서 보여지는 광 쌍안정 특성을 이용하여 광 메모리 소자로서 이용할 수 있는 flip-flop 특성을 나타낼 수 있다. Turn-on 문턱값과 turn-off 문턱값 사이의 전류를 걸어주고 각각 turn-on 문턱값을 넘는 펄스와 turn-off 문턱값 아래로 내려가는 펄스를 줌으로서 각각 set과 reset 상태를 유지하는 flip-flop 특성을 얻을 수 있다. 그림 10은 set 또는 reset 광 펄스의 인가에 따라 광 메모리 소자로서 동작 가능함을 확인한 결과이다. 입력광의 파장은 1540 nm이며, 입력광 파장 변화에 대한 영향은 거의 없다. 입력광 펄스에 따라 flip-flop 특성을 볼 수 있다. 그림 10(a)는 광 펄스 폭이 10 ns인 경우로 2 ns인 경우가 오히려 더욱 빨리 안정된 상태를 유지함을 볼 수 있다. 그러므로 충분한 스위칭 에너지를 만족한다면 광 펄스의 폭은 작을수록 좋다.

2. 파라미터의 변화에 따른 flip-flop 특성 변화

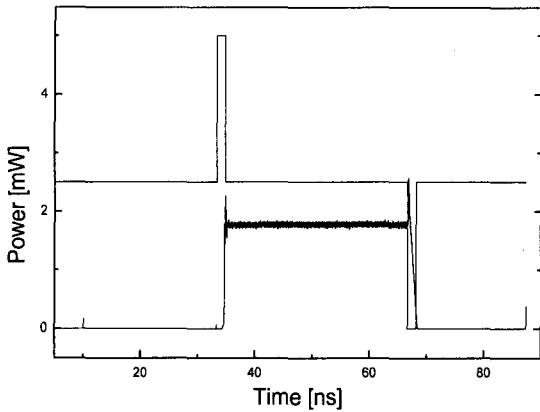
캐리어 생존시간과 이득 곡선 기울기 등을 조절함에 따라 쌍안정 특성도 변화하게 되고, 적당한 값들을 취해 줌으로서 LD 광출력의 반응 시간을 줄일 수 있다. 그림 11은 이득 곡선 기울기의 변화 없이 캐리어 생존시간을 6 ns로 했을 경우에 대하여 그림 8에 따라 바이어스 전류로 105 mA를 인가한 뒤 입력광 펄스에 대한 출력광 파워의 set-reset 특성을 나타낸 것이다. 그림 11(a)는 1.5 ns의 폭을 가진 광 펄스를 1.5 mW의 스윙으로 각각 set과 reset 스위칭 펄스를 인가하였을 때의 set-reset 특성을 나타낸 것이다. Set의 경우 안정된 상태의 출력을 유지하기까지 약간의 지연시간이 있음을 볼 수 있으며, reset의 경우는 스위칭 에너지가 충분하지 못하여 다시 set 상태로 되돌아 감을 볼 수 있다. 그림 11(b)는 스윙 폭을 2.5 mW로 하여 스위칭 에너지를 2.25 pJ에서 3.75 pJ로 올린 다음 set-reset 특성을 살펴본 것이다. 그림 11(a)와 비교하였을 때, set의 경우 시간 지연이 거의 없이 안정된 상태로 유지됨을 볼 수 있으며, reset의 경우도 충분한 스위칭 에너지가 공급되어 바로 reset 상태를 유지함을 알 수 있다. 캐리어 생존시간만을 변화시켜 특성을 살펴본 결과 스위칭 에너지의 증가로 LD 광출력의 반응 시간을 1.5 ns까지 줄일 수 있음을 보였다.

이번엔 캐리어 생존시간을 10 ns로 유지하고 이득 곡선 기울기를 $3 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ 으로 증가시킨 다음 쌍안정 특성을 살펴보았다. LD에 걸어주는 바이어스 전류를

85 mA로 고정시킨 상태에서의 입력광 펄스에 대한 set-reset 특성을 그림 12에 나타내었다. 스윙 폭은 2.5 mW로서 스위칭 에너지는 2.5 pJ로 주었다. 안정된 set 상태까지 약간의 지연시간이 있긴 하지만 1 ns의 펄스 폭에도 flip-flop 특성을 얻을 수 있었다.



(a)



(b)

그림 11. 입력광 펄스(1.5 ns)에 대한 출력광 파워의 set-reset 특성. (a) 2.25 pJ, (b) 3.75 pJ

Fig. 11. Set-reset characteristic of output power for input optical pulse(1.5 ns). (a) 2.25 pJ, (b) 3.75 pJ.

캐리어 생존시간과 이득 곡선 기울기를 같이 변화시킨 다음의 set-reset 특성을 그림 13에 나타내고 있다. 캐리어 생존시간과 이득 곡선 기울기의 값은 각각 6 ns와 $3 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ 으로 하였다. 바이어스 값은 91 mA로 그림 5의 경우보다 다소 낮아졌고 1.2 ns의 광 펄스에도 안정된 set-reset 동작을 확인할 수 있다. 광 스위칭 시간은 1.2 ns로 그림 12의 경우보다 약간 늘긴 했

지만 광 스위칭 에너지는 2.4 pJ로 약간 줄었고 안정된 flip-flop 특성을 보이고 있어 광메모리 소자로 활용할 수 있음을 확인하였다.

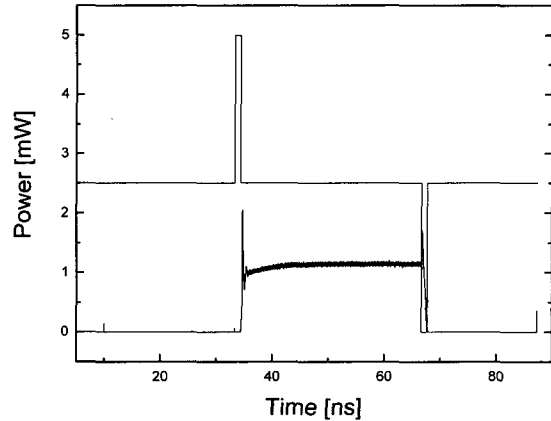


그림 12. 입력광 펄스(스위칭 에너지 2.5 pJ, 펄스폭 1 ns)에 대한 출력광 파워의 set-reset 특성

Fig. 12. Set-reset characteristic of output power for input optical pulse(2.5 pJ).

지금까지는 이상적인 rectangular set-reset 펄스에 따른 광 쌍안정 소자로서의 다전극 DFB-LD의 flip-flop 특성을 살펴보았다. 그림 14에선 그림 13과 같은 파라미터 값에 대해 좀 더 실제적인 펄스에 가까운 Gaussian 입력광 펄스에 대한 set-reset 특성을 나타내고 있다. Rectangular 펄스가 인가된 특성에 비해 안정된 상태까지 약간의 지연시간이 있긴 하지만 유용한 광 메모리 소자로 활용할 수 있는 flop-flop 특성을 확인할 수 있다.

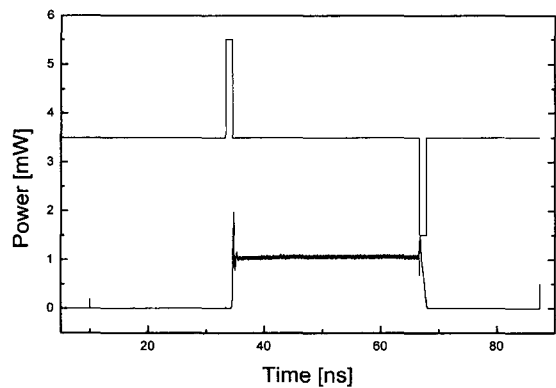


그림 13. 입력광 펄스(2.4 pJ)에 대한 출력광 파워의 set-reset 특성

Fig. 13. Set-reset characteristic of output power for input optical pulse(2.4 pJ).

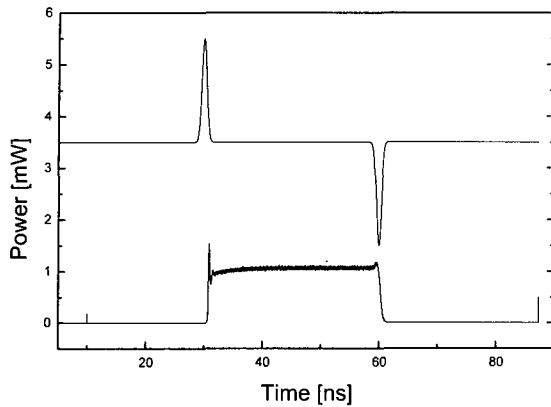


그림 14. Gaussian 입력광 펄스(1.2 ns)에 대한 출력광 파워의 set-reset 특성

Fig. 14. Set-reset characteristic of output power for input optical Gaussian pulse(1.2 ns).

V. 결 론

광 쌍안정 레이저는 광 스위칭 시스템과 광 컴퓨터 시스템 등을 비롯하여 광통신 시스템의 여러 분야에서 많은 관심을 끌고 있는 소자이다. 쌍안정 LD는 큰 광 이득으로 인하여 낮은 스위칭 에너지, 높은 on/off 비를 장점으로 갖는다. 또한 외부로부터 입사되는 광에 의한 광 쌍안정 특성을 갖고 있어 파장 변환, 광 논리 소자 등 여러 응용 분야에 쓰일 수 있는 가능성이 있다.

시간 변수가 있는 결합 파동방정식을 연산자 분리 개념을 사용하여 시간에 따른 캐리어 추적 알고리즘을 전산화를 통해 광 쌍안정 현상에 대한 동적 특성을 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 결과를 통하여 다전극 DFB-LD에서 광 쌍안정 특성을 얻을 수 있음을 확인하였고, 그 특성을 이용하여 광 메모리 소자로 사용할 수 있는 가능성을 확인하였다.

전류 대 광출력, 입력광 파워 대 출력광 파워에서 쌍안정 현상을 확인하였고, 이를 이용하여 입력광 펄스의 인가에 따른 set-reset 동작을 살펴보았다. 그리고 캐리어 생존시간, 이득 폭선 기울기 등의 값들을 조절하여 LD 광출력의 반응 시간을 줄일 수 있음을 살펴보았다.

시뮬레이션을 통하여 2.4 pJ의 적은 스위칭 에너지로 set-reset의 스위칭이 가능하며, 1.2 ns의 스위칭 시간으로 안정적인 flip-flop 특성을 얻을 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] H. Kawaguchi, "Progress in optical functional devices using two-section laser diode/amplifiers," *IEE Proceedings-J*, Vol. 140, No. 1, pp. 3~15, 1993.
- [2] M. Jinno, T. Matsumoto, "Nonlinear operations of 1550 nm multielectrode DFB-LD and their applications for optical signal processing," *IEEE JLT*, Vol. 10, No. 4, pp. 448~475, 1992.
- [3] S. Pegg, M. Adams, and K. Poguntke, "Absorptive switching and spectral characteristics of the side-injection light-controlled bistable laser diode," *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol. 36, No. 1, pp. 94~99, 2000.
- [4] G. Lasher, "Analysis of a proposed bistable injection laser," *Solid State Electron.*, Vol. 7, pp. 707~716, 1964.
- [5] H. Tsuda, K. Nonaka, K. Hirabayashi, H. Uenohara, H. Iwamura, and T. Kurokawa, "Wide range wavelength conversion experiments using a side-injection light-controlled bistable laser diode," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 63, No. 23, pp. 3116~3118, 1993.
- [6] K. Nonaka, Y. Noguchi, H. Tsuda, and T. Kurodawa, "Digital signal regeneration with side-injection-light-controlled bistable laser diode as a wavelength converter," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 7, pp. 29~31, Jan. 1995.
- [7] A. Levi, R. Nottenburg, R. Nordin, T. Tanbun-따, and R. Logan, "Multielectrode quantum well laser for digital switching," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 56, No. 12, pp. 1095~1097, 1990.
- [8] K. Inoue, "Technique to compensate for waveform distortion in a gain-saturated semiconductor optical amplifier using semiconductor saturable absorber," *Electron. Lett.*, Vol. 34, No. 4, pp. 376~378, 1998.
- [9] K. Nonaka, H. Takara, K. Uchiyama, and A.

- Takada, "Bit-rate flexible all-optical RZ/NRZ transformation with saturable absorption laser diode," in *CLEO '98, CMA6*, pp. 5~6.
- [10] K. Nonaka, F. Kobayashi, K. Kishi, T. Tadokoro, Y. Itoh, C. Amano, and T. Kurokawa, "Direct time-domain optical demultiplexing of 10-Gb/s NRZ signals using side-injection light-controlled bistable laser diode," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 10, pp. 1484~1486, Oct. 1998.
- [11] T. Odagawa and S. Yamakoshi, "Optical set-reset operations of bistable laser diode with single-wavelength light," *Electron. Lett.*, Vol. 25, No. 21, pp. 1428~1429, 1989.
- [12] H. Uenohara, Y. Kawamura, H. Iwamura, K. Nonaka, H. Tsuda, and T. Kurokawa, "Set and reset operation dependence on input light intensity of a side-light-injection MQW bistable laser," *Electron. Lett.*, Vol. 29, No. 18, pp. 1609~1611, 1993.
- [13] K. Nakatsuhara, T. Mizumoto, R. Munakata, Y. Kigure and Y. Naito, "Demonstration of all-optical set-reset operation in a GaInAsP waveguide bistable device," in *Proc. LEOS '97 10th Annual Meeting*, Vol. 1, pp. 246~247, 1997.
- [14] M. Hill, H. de Waardt, G. Khoe, and H. Dorren, "All-optical flip-flop based on coupled laser diodes," *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol. 37, No. 3, pp. 405~413, 2001.
- [15] H. Kawaguchi, "Semiconductor photonic functional devices," *IEEE Circuits and Devices Magazine*, Vol. 7, pp. 26~31, May. 1991.
- [16] B. Kim and Y. Chung, "An efficient split-step time-domain dynamic modeling of DFB/DBR laser diodes," *IEEE J. of Quantum Electron.*, Vol. 36, No. 7, pp. 787~794, 2000.

저 자 소 개



金 根 徹(正會員)

2000년 2월 광운대학교 전자공학부 학사. 2002년 2월 광운대학교 전자통신공학과 석사. 2002년 3월~현재 광운대학교 전자통신공학과 박사과정. 2002년 1월~현재 한국과학기술연구원(KIST) 학생연구원. <주관심

분야: 광통신 시스템 및 광소자, 광인터넷>



鄭 榮 哲(正會員)

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

1981년~1986년 LG 전선기술연구소 1987년~1988년 한국과학기술연구원(KIST). 1992년~1993년 Optoelectronics Technology Center(UCSB). 1993년~현재 광운대학교 전자공학부/전자통신공학과 교수. <주관심분야: 광통신용 소자/모듈 및 광통신 시스템>