

論文97-34D-10-12

LD Gain-Switching에 의한 초단 광 펄스 발생 해석

(Analysis of Ultra-Short Optical Pulse Generation by LD Gain-Switching)

金 允 中 * , 金 東 珏 * , 金 昌 敏 *

(Yun-Jung Kim, Dong-Gak Kim, and Chang-Min Kim)

요 약

반도체 레이저에서 Gain-Switching에 의한 초단 광 펄스의 발생과정을 해석하였다. Fabry-Perot 공진기 구조를 갖는 파장이 $1.3\mu\text{m}$ 인 InGaAsP buried-heterostructure 레이저를 대상으로 울방정식을 이용하여 모의전산하였다. 주입 전류 펄스의 바이어스 전류 J_b , 펄스폭 T_a , 펄스크기 J_p 를 파라미터로 하여 이들이 광 펄스에 미치는 영향을 살펴보고, 최대 피크치를 갖는 단일 광펄스를 얻을 수 있는 주입 전류의 조건을 도출하였다. 또한 단일 광펄스를 발생시킬 수 있는 전류 펄스의 반복율 RR이 문턱치 이하로 제한됨을 알 수 있었고 반복율의 증가에 따른 period doubling 현상을 관찰하였다.

Abstract

For a InGaAsP buried-heterostructure $1.3\mu\text{m}$ LD with Fabry-Perot cavity structure, the procedures of ultra-short optical pulse generation are analyzed by simulating the rate equations. Investigating the effects of injected current pulse parameters such as bias J_b , pulse width T_a , and pulse amplitude J_p on the generated optical pulses, we derive the optimum conditions to obtain a single optical pulse with strong peak value. We also observe that the repetition rate of current pulses needs to be restricted under a certain threshold to generate a train of single optical pulses, and that the period doubling phenomenon takes place by increasing the repetition rate.

I. 서 론

반도체 레이저로부터 광 펄스를 발생시키는 것은 통신분야나 신호처리 분야에서 폭넓게 응용되고 있다. 특히 광 솔리톤 전송 시스템이나 광전 샘플링 시스템에서는 펄스 폭이 10~20ps 이하의 초단 광펄스가 요구된다. 이러한 광 펄스는 일반적으로 반도체 레이저의 직접 변조 방식에 의해 얻을 수 있다^[1]. 그러나 이러한 직접 변조방식은 발생하는 광 펄스의 펄스 폭이 주입전류의 펄스 폭과 유사하여, 펄스 폭이 10~20

ps 이하의 초단 광펄스를 얻기에는 적당하지 않다. 이러한 이유로 다양한 초단 광펄스 발생방법이 시도되어져 왔으며 그 예로써 active 및 passive mode locking^{[2]-[4]}, Q-switching, fiber compression^{[5],[6]} 그리고 gain-switching^{[7]-[10]}이 있다. Mode locking에 의해서는 1ps 미만의 폭을 갖는 초단 광펄스를 얻는 것이 가능하다. 그러나 mode locking이나 Q-switching에 의한 방법은 외부 공진기나, Saturable absorber와 같은 특별한 구조가 필요하다. 반면, gain-switching은 비록 10~50ps의 상대적으로 넓은 펄스 폭을 갖지만 일반적인 구조를 지닌 반도체 레이저의 gain을 전류에 의해 스위칭하므로 특별한 구조 없이도 간단히 구현 할 수 있다. 응용 면에서 gain-switching은 여러 이점을 갖는 방법이라

* 正會員, 서울시立大學校 電子工學科

(The Univ. of Seoul, Dept. of Electronics Eng.)

接受日字:1997年3月20日, 수정완료일:1997年9月19日

할 수 있다.

Gain-switching에 대한 연구는 실험과 율방정식(rate equation)의 수치해석을 통하여 이루어져 왔다^{7)~10)}. Gain-switching에 의해 발생하는 광 펄스의 펄스 폭은 주입전류의 바이어스 전류, 펄스 크기, 펄스 폭 등의 파라미터의 영향에 민감하게 변화된다. 주입 전류 펄스 폭과 반복율이 주어지면 적당한 바이어스에 대하여 최소의 펄스 폭, 최대의 피크전력을 갖는 최적의 광펄스를 얻을 수 있음이 실험과 수치해석을 통해 확인되었다¹⁹⁾. 또한 광자 수명(photon lifetime)이 발생하는 광 펄스에 미치는 영향도 고찰되었다. 공진기의 길이를 축소시키므로써 광자 수명을 단축시킬 수 있고 이에 따라 발생하는 광 펄스의 폭을 줄이는 방안도 제안되었다¹⁰⁾.

본 논문에서는 율방정식의 수치해석을 통하여 펄스 폭이 수십에서 수백ps에 이르는 전류 펄스에 의해 구동되는 반도체 레이저의 gain-switching을 살펴보았다. 먼저, II장에서 율방정식과 해석에 사용된 레이저의 파라미터, 그리고 주입 전류모형을 설명하였다. III장에서는 바이어스 전류와 전류 펄스 폭의 변화에 따른 광 펄스 응답을 살펴보았다. IV장에서는 펄스크기와 반복율의 변화가 광펄스 응답에 미치는 영향을 살펴보았다.

II. 율방정식과 주입 전류모형

이론적인 접근은 반도체 레이저의 특성 해석에 널리 쓰이고 있는 율방정식을 이용하였다¹⁸⁾. 율방정식은 전자(Carrier)밀도와 광자(Photon)밀도에 대한 시간에 따른 변화를 기술하고 있다. 본 논문에서는 다음과 같이 gain saturation의 영향을 고려한 단일모드 율방정식을 이용한다^{19)~10)}.

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\Gamma v_g G(n)}{1 + \epsilon P} P - \frac{P}{\tau_p} + \beta_{sp} B n^2 \quad (1)$$

$$\frac{dn}{dt} = \frac{I(t)}{ed} - \frac{n}{\tau_e(n)} - \frac{\Gamma v_g G(n)}{1 + \epsilon P} F \quad (2)$$

여기서 P와 n은 레이저 공진기내의 정규화된 광자 밀도와 전자밀도이다. τ_p 와 $\tau_e(n)$ 은 각각 광자와 전자의 수명(life time)이다. G(n)은 선형 이득 함수이고, v_g 는 활성영역(active layer)에서의 광의 군속도이다. Γ 는 광 집속인자(confinement factor)이다. β_{sp} 은 자연방출에 의해 발생하는 광자 중에서 레이징 모

드에 관여하는 비를 나타내는 양으로 자연방출 인자(spontaneous-emission factor)이다. B는 radiative-recombination coefficient 이고, ϵ 은 gain compression factor 이다. d는 활성영역의 두께이고, e는 단위 전하량이다.

식 (1)과 (2)에서, 전자밀도에 의존하는 파라미터인 전자수명 $\tau_e(n)$ 과 선형 이득 함수 G(n)은 다음과 같이 나타낼 수 있다¹⁰⁾.

$$\tau_e^{-1}(n) = A_{nr} + Bn + Cn^2 \quad (3)$$

$$G(n) = a(n - n_0) \quad (4)$$

여기서 A_{nr} 은 nonradiative recombination rate이고, C는 Auger recombination coefficient이다. a는 이득 상수(gain constant)이고, n_0 는 이득과 손실이 상쇄되는 때의 전자밀도 이다.

위의 (1), (2)식에서 gain-switching의 광 출력은 어느 정도 예측할 수 있다. 먼저 (1)식에서 좌변은 광자의 시간에 따른 변화이고 우변의 첫째 항은 gain과 광자의 곱으로써 gain항이 되겠고, 두 번째 항에서 τ_p^{-1} 는 불성에 관련된 항으로써 광자의 수명에 따른 감소를 의미한다. 또한 마지막 항은 전자밀도의 재결합 정도를 나타낸다. 우변의 첫 번째 항에서의 선형이득함수 G(n)은 (4)식과 같이 전자 밀도 n에 비례하여 증가하므로 (1)식에서 광자의 발생정도는 전자 밀도가 증가함에 따라 증가하고 이에 따라 증가된 광자가 loss에 관여하여 gain을 넘어서게 되면 다시 감소할 것이라는 것을 예측할 수 있다.

표 1. 1.3 μ m Buried-heterostructure 레이저 다이오드의 파라미터 값

Table 1. Typical Parameter values for the given 1.3 μ m Buried-heterostructure LD.

Parameter	Symbol	Value
Active-layer thickness	d	0.2 μ m
Confinement factor	Γ	0.3
Gain constant	a	2.5 $\times 10^{-16}$ cm ²
Carrier density at transparency	n_0	1 $\times 10^{18}$ cm ⁻³
Nonradiative recombination rate	A_{nr}	1 $\times 10^8$ s ⁻¹
Radiative recombination coefficient	B	1 $\times 10^{-10}$ cm ³ /s
Auger recombination coefficient	C	3 $\times 10^{-23}$ cm ⁶ /s
Photon lifetime	τ_p	1.6ps
Spontaneous-emission factor	β_{sp}	10 ⁻³
Gain Compression factor	ϵ	1 $\times 10^{-17}$

또한 (2)식은 전자밀도의 변화에 대해 기술한 식이다. 우변의 첫째항은 주입전류이고 둘째항의 τ_e^{-1} 또한 물성에 관련된 식으로써 전자의 수명에 따른 감소를 의미한다. 마지막 항은 광자의 발생에 관여하여 소비되는 전자밀도를 나타낸다. 즉, 전류주입에 의해 전자밀도는 증가할 것이며, 자체 loss와 광자발생에 의해 감소할 것을 미리 예측할 수 있다.

본 논문에서 사용되는 파라미터는 표 1과 같은 전형적인 $1.3\mu\text{m}$ InGaAsP buried-hetero structure laser의 파라미터 값을 사용하였다^{[10] [11]}.

주입 전류밀도 $J(t)$ 는 DC 바이어스 J_b 와 전류밀도 펄스로 구분될 수 있다. 즉, 주입 전류밀도 $J(t)$ 는 다음과 같다. 실제 LD에 전류밀도 펄스는 구형파의 형태를 갖지만 LD 내부의 기생 저항 및 기생 용량 등과 같은 기생 요소들에 의해 time delay를 갖게 된다. 따라서 주입전류 밀도는 다음 식과 같이 나타내어진다^[11].

$$J(t) = J_b + J_p \sin^2\left(\frac{\pi t}{2T_d}\right) \quad (5)$$

여기서 J_b 는 바이어스 전류이고, T_d 는 전류밀도 펄스의 FWHM, J_p 는 전류밀도 펄스의 크기이다. J_p 는 주입할 수 있는 전류의 펄스크기를 고려하여 문턱 전류밀도 J_{th} 의 6~10배로 사용하였다. 또한 전류 펄스는 주기적으로 반복된다. 여기서 반복율(repetition rate, RR)은 각 반복 펄스간에 영향이 없는 낮은 반복율(RR = 100MHz)에서 최적의 광 펄스를 구해보았고, 반복율을 높여가며 광펄스의 크기 변화를 살펴보았다. 식 (1)과 (2)의 정상상태 응답으로 부터 문턱 전류밀도 J_{th} 를 구하고^[12], 또한 바이어스 전류밀도 J_b 에 대응되는 전자밀도 $n(t_0)$ 와 광자밀도 $P(t_0)$ 를 구할 수 있다. 이를 초기치로 하여 비선형 미분방정식 (1)과 (2)를 Runge-Kutta-Gill 방법을 이용하여 수치해석한다.

III. 주입전류의 바이어스 J_b 와 펄스 폭 T_d , 펄스크기 J_p 에 따른 광 펄스 응답

1. 바이어스 J_b 가 변화하는 경우

먼저 각기 다른 바이어스를 갖는 전류밀도 J 에 따른 전자밀도 n 과 광자밀도 P 의 시간에 따른 변화를 식 (1)과 (2)를 통하여 모의전산하고자 한다. 전류 밀도 펄스의 폭 $T_d = 200\text{ps}$, 펄스크기 $J_p = 8J_{th}$, 반복율

RR = 100MHz로 고정시키고, 네 가지 경우의 바이어스 전류 J_b 에 대하여 고려하였다.

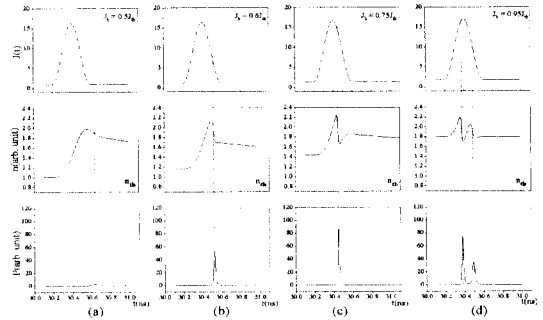


그림 1. 바이어스 전류 J_b 에 따른 전자밀도 n , 광자밀도 P 의 시간에 대한 변화 $T_d = 200\text{ps}$, $J_p = 8J_{th}$, RR = 100MHz, J , n , P 는 임의의 단위 (a) $J_b = 0.5J_{th}$, (b) $J_b = 0.6J_{th}$, (c) $J_b = 0.75J_{th}$, (d) $J_b = 0.95J_{th}$
 Fig. 1. The density of the electrons and photons as a function of time. The units of J , n and P are arbitrary. $T_d = 200\text{ps}$, $J_p = 8J_{th}$, RR = 100MHz (a) $J_b = 0.5J_{th}$, (b) $J_b = 0.6J_{th}$, (c) $J_b = 0.75J_{th}$, (d) $J_b = 0.95J_{th}$

그림 1은 전류밀도 J 의 변화에 따른 전자밀도 n , 광자밀도 P 의 변화를 J_b 를 파라미터로 하여 광펄스의 시간에 따라 나타내고 있다.

즉 그림 1(a)와 같이 주입전류의 펄스폭에 비해 bias전류 J_b 가 너무 작은 경우에는 전류 pulse의 크기가 증가되어도 문턱전자밀도 n_{th} 를 넘는 전자밀도 n 이 미약하고 광펄스도 미약하게 된다. 그림 1(b)의 경우는 J_b 가 조금 개선된 경우이지만 아직도 광펄스의 크기가 작은 응답을 보이게 된다. 그림 1(c)의 경우는 주입전류의 펄스폭에 대해 bias가 적절히 잡혀 단일 광펄스 응답을 보인다. 그러나 그림 1(d)와 같이 bias가 너무 큰 경우에는 bias 전류에 의한 n 이 n_{th} 분군에 와 있으므로 주입 전류 pulse가 증가함에 따라 n 이 n_{th} 를 넘어서게 되고, 이에 따라 광펄스가 발생하고 광펄스가 peak를 이루자마자 잠시 전자밀도는 감소하여 n_{th} 밑으로 떨어진다. 이후에도 주입전류는 비교적 큰 값을 유지한 채 인가되고 있으므로 다시 n 이 증가하여 n_{th} 를 넘어서게 되면 이 영향으로 광펄스는 단일 pulse가 아닌 연속 pulse로 이루어지게 되는 것이다.

결국 J_b 를 적절히 선택함으로써 피크전력은 최대가 되고 동시에 펄스 폭은 최소가 되는 바람직한 광 펄스

를 얻을 수 있다. 그리고, J_b 가 적절한 값보다 작은 경우에는 상대적으로 피크전력이 작고 폭이 넓은 광 펄스를 얻게 되며, 적절한 값의 J_b 보다 큰 경우에는 연속펄스로 이루어지는 광 펄스가 나타나게 됨을 알 수 있다.

2. 펄스폭 T_d 가 변화하는 경우

각기 다른 전류 펄스 폭 T_d 를 갖는 전류밀도 J 에 대한 전자밀도 n 과 광자밀도 P 의 시간에 따른 변화를 식 (1)과 (2)를 통하여 모의전산하고자 한다. 바이어스 $J_b = 0.8J_{th}$, 전류의 펄스크기 $J_p = 8J_{th}$, 반복율 $RR = 100\text{MHz}$ 로 고정시키고, 세 경우의 전류밀도 펄스의 폭 T_d 에 대하여 고려하였으며, 그 결과를 그림 2에 나타 내었다.

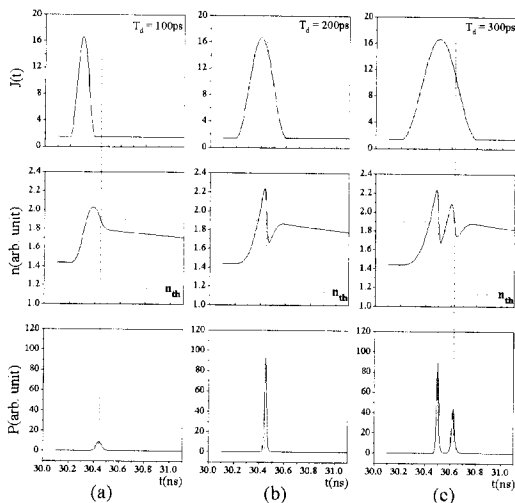


그림 2. 전류 펄스 폭 T_d 에 따른 전자밀도 n , 광자 밀도 P 의 시간에 대한 변화 $J_b = 0.75J_{th}$, $J_p = 8J_{th}$, $RR = 100\text{MHz}$, J , n , P 는 임의의 단위 (a) $T_d = 100\text{ps}$, (b) $T_d = 200\text{ps}$, (c) $T_d = 300\text{ps}$

Fig. 2. The density of of the electrons and photons as a fuction of time. The units of J , n and P are arbitrary. $J_b = 0.75J_{th}$, $J_p = 8J_{th}$, $RR = 100\text{MHz}$. (a) $T_d = 100\text{ps}$, (b) $T_d = 200\text{ps}$, (c) $T_d = 300\text{ps}$

그림 2(a)와 같이 bias 전류에 비해 주입전류 펄스 폭이 너무 좁은 $T_d = 100\text{ps}$ 의 경우에는, 전자밀도가 증가하여 최고점에 도달하기 전에 전류주입이 끝난다. 따라서 발생하는 광펄스가 크기가 작고 상대적으로 폭이 넓은 응답을 보이게 된다. 그림 2(b)와 같이 주입

전류의 폭이 적절한 $T_d = 200\text{ps}$ 의 경우는 상대적으로 높은 피크 전력과 좁은 폭을 갖는 거의 단일 광 펄스를 볼 수 있다. 그림 2(c)의 $T_d = 300\text{ps}$ 의 경우와 같이 bias전류에 비해 주입전류 펄스폭이 넓게 되면 일단 광 펄스를 발생시켜 전자밀도가 감소하여도 폭이 넓은 전류 펄스가 아직 남아있어 전류가 주입된다. 따라서 다시 전자밀도가 증가하게 되며 다중 광 펄스 응답을 갖게 된다.

3. 전류 펄스 크기 J_p 가 변화하는 경우

펄스크기 J_p 를 파라미터로 하고, 적당한 T_d 에 대하여 J_b 를 변화시켜가며 광펄스 응답을 얻어 보고자 한다. 그림 3은 $J_p = 6J_{th}$, $J_p = 8J_{th}$, $J_p = 10J_{th}$ 의 세 경우에 대하여, 각각 전류 펄스 폭 $T_d = 100\text{ps}$, $T_d = 200\text{ps}$ 에 대해 광펄스의 peak치와 펄스폭의 변화를 모의전산한 결과이다.

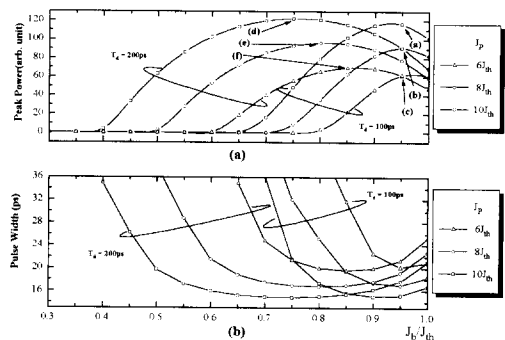


그림 3. 파라미터 J_p 에 따른 광 펄스 피크 전력과 폭의 변화 $RR = 100\text{MHz}$

Fig. 3. Peak pulse power and width of optical pulse as a function of the bias current. $RR = 100\text{MHz}$.

그림 3에서 주입전류의 peak값이 커지면 그에 대한 광펄스의 피크전력 또한 크기가 증가하고 동시에 각 광펄스의 펄스폭은 줄어드는 현상을 관찰할 수 있다. 그림 3의 첫 번째 그림에서 각 곡선의 최대점에 해당하는 광펄스의 예를 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서 (a), (b), (c), 는 각각 주입전류의 펄스폭 T_d 가 100ps 일 때이고 (d), (e), (f)는 T_d 가 200ps 일 때 각각 J_p 의 변화에 대해 나타낸 것이다.

그림 4를 살펴보면, $T_d = 100\text{ps}$ 인 경우 J_p 가 더 클수록 발생시킬 수 있는 광 펄스의 피크전력은 더 크고 최소 펄스 폭은 더 감소됨을 볼 수 있다. $T_d = 200\text{ps}$ 인 경우도 J_p 가 클수록 발생시킬 수 있는 광펄

스의 피크전력은 더 커지나, 주입전류의 펄스폭이 넓기 때문에 제2의 광펄스가 나타남을 볼 수 있다.

수 있게 된다.

IV. 반복율 RR(Repition Rate)에 따른 광펄스 응답

1. 반복율 RR의 문턱치

III장에서는 반복율이 100MHz의 낮은 반복율에 대하여 고찰하였다. 100MHz정도로 낮은 반복율의 경우에는 주입전류가 단일 펄스로 주어지는 경우와 같이, 앞 광펄스가 뒤의 광펄스에 미치는 영향이 거의 없게 된다. 그러나 반복율이 높아지면 이전 광펄스가 다음 광펄스에 영향을 미칠 수도 있음을 충분히 예상할 수 있다. 초단 광펄스 발생시 폭이 좁고 광펄스의 크기가 큰 광펄스를 얻는 것도 중요하지만 두 번째 펄스가 나타나지 않는 단일 광펄스를 얻는 것 또한 중요하다. 반복율의 증가에 따른 광펄스 크기의 변화를 두 번째 펄스를 중심으로 고찰하기로 한다.

먼저 주입 전류의 펄스의 크기와 폭을 $T_d = 200\text{ps}$, $J_p = 8J_{th}$ 로 고정하고 바이어스 전류 J_b 를 파라미터로 하여, 반복율 RR의 증가에 따른 연속 광펄스의 크기 변화를 모의전산하여 그림 5에 나타내었다.

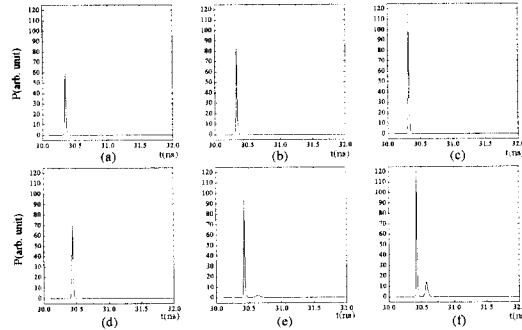


그림 4. 그림 3의 선택된 point (a), (b), (c), (d), (e), (f)에서 광자밀도 P의 변화 $T_d = 100\text{ps}$; (a) $J_p = 6J_{th}$, $J_b = 0.95J_{th}$ (b) $J_p = 8J_{th}$, $J_b = 0.95J_{th}$ (c) $J_p = 10J_{th}$, $J_b = 0.95J_{th}$ $T_d = 200\text{ps}$; (d) $J_p = 6J_{th}$, $J_b = 0.75J_{th}$ (e) $J_p = 8J_{th}$, $J_b = 0.8J_{th}$ (f) $J_p = 10J_{th}$, $J_b = 0.85J_{th}$

Fig. 4. Photon densities P as a function of time for selected points (a), (b), (c), (d), (e), (f) of fig. 3. $T_d = 100\text{ps}$; (a) $J_p = 6J_{th}$, $J_b = 0.95J_{th}$ (b) $J_p = 8J_{th}$, $J_b = 0.95J_{th}$ (c) $J_p = 10J_{th}$, $J_b = 0.95J_{th}$ $T_d = 200\text{ps}$; (d) $J_p = 6J_{th}$, $J_b = 0.75J_{th}$ (e) $J_p = 8J_{th}$, $J_b = 0.8J_{th}$ (f) $J_p = 10J_{th}$, $J_b = 0.85J_{th}$.

앞의 그림 1, 2, 3, 4의 결과들로부터 다음의 사실을 알 수 있다. 주입전류가 인가되어 적정치에 다다르게 되면 전자밀도는 peak치를 이루게 된다. 이 전자밀도가 다시 하강을 시작하여 n_{th} 에 다다르는 순간 전자밀도의 적분치는 최대가 되며 이때 광펄스가 나타나게 된다. 광펄스가 일어났다는 것은 곧, 유도 방출로 말미암아 분포반전을 이루고 있는 전자밀도의 순간적인 감소를 의미한다. 그러나 이러한 전자밀도의 감소에도 불구하고 아직도 주입전류가 충분한 크기를 유지하고 있으면 또 다시 전자밀도는 제2의 peak치를 이루게 되어 제2의 광펄스를 발생시키게 된다. 이후 유사한 과정을 반복할 수도 있다.

따라서 효율적인 단일 펄스를 얻는 방법은 다음으로 요약될 수 있다. 주입전류가 증가하여 전자밀도가 peak치를 이루고 다시 하강하여 n_{th} 를 지나는 순간 광펄스가 나온다. 이때 제 2의 전자밀도 폭선이 문턱전자밀도를 넘지 못하도록 주입전류 $J(t)$ 의 파라미터 J_b , T_d , J_p 등을 조절하면 효율적인 단일 광펄스를 얻을

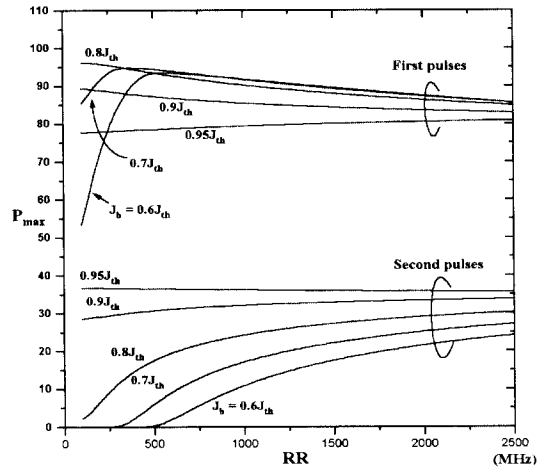
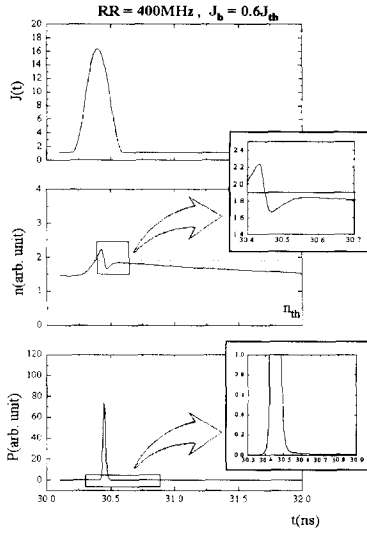


그림 5. 주입전류의 반복율 증가에 따른 광펄스 응답 $T_d = 200\text{ps}$, $J_p = 8J_{th}$

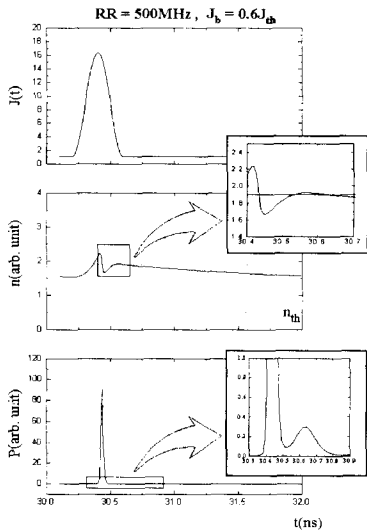
Fig. 5. Optical pulse response as a function of repetition rate of injected current. $T_d = 200\text{ps}$, $J_p = 8J_{th}$.

반복율이 100MHz로 낮은 경우, 바이어스 전류 J_b 의 크기에 따라 두 번째 광펄스의 유무가 결정되는 과정은

이미 III장에서 확인된 바 있다. 그림 5에서도 $RR = 100\text{MHz}$ 인 경우 $J_b = 0.8J_{th}$ 이상에 대해서는 두 번째 광펄스가 나타나며 그 이하의 바이어스 전류에 대해서는 단일 광펄스만이 나타남을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 6. 주입전류의 반복율의 증가에 따른 광펄스 응답 형태 $T_d = 200\text{ps}$, $J_p = 8J_{th}$, $J_b = 0.6J_{th}$
(a) $RR = 400\text{MHz}$ (b) $RR = 500\text{MHz}$

Fig. 6. Optical pulse response as a function of time for two different repetition rate of injected current. $T_d = 200\text{ps}$, $J_p = 8J_{th}$, $J_b = 0.6J_{th}$
(a) $RR = 400\text{MHz}$ (b) $RR = 500\text{MHz}$

그러나 점점 반복율 RR 을 높여감에 따라 $J_b = 0.7J_{th}$ 이하의 바이어스 전류에 대해서도 두 번째 광펄스가 나타나기 시작하고, 첫 번째 광펄스의 크기는 더 이상 증가를 멈추는 것을 알 수 있다. 이러한 현상을 설명하기 위해 그림 6에 바이어스 전류 $J_b = 0.6J_{th}$ 일 때 400MHz 와 500MHz 의 반복율에서의 광펄스 응답의 차이를 나타내었다.

그림 6은 단일 펄스가 나오는 경우와 두 번째 펄스가 나오는 경우의 경계부근을 조사하여 살펴본 것이다. 그림 6(a)는 단일 광펄스가 나타나는 최대 반복율 부근의 광 펄스 응답이며 그림 6(b)는 약간 증가된 반복율의 주입전류에 의해 두 번째 광펄스가 발생하기 시작하는 부근에서의 응답 과정이다.

그림 6(a)의 그림을 보면, 주입전류에 의해 전자밀도가 증가하여 광펄스를 발생시킨 후 일단 감소하지만 주입전류의 폭이 비교적 넓으므로 전자밀도는 일시 증가하는 현상을 보이게 된다. 그러나 반복율이 어느 한 계이하이므로 n_{th} 를 넘지 못하고 다시 천천히 감소하게 된다. 따라서 그에 따른 광펄스 응답이 단일 펄스 형태를 보이게 된다.

그림 6(b)의 경우는 그림 6(a)에 비하여 반복율 RR 이 조금 증가한 경우이다. 광펄스 응답과정도 이전과 거의 동일하여, 광펄스를 발생시킨 후 역시 계속되는 주입전류로 말미암아 전자밀도는 일시 증가한 후 천천히 감소하려는 현상을 보이려 한다. 그러나 반복율이 증가할수록, 생성된 광펄스 이후 축적되는 전자밀도는 미세하게나마 증가하게 되며 이 증가분은 다음 펄스에 영향을 미치게 된다. 축적된 전자밀도의 재 증가되는 부분이 그림 6(b)의 경우에는 n_{th} 를 넘는 정도에 이르게 되고 두 번째 기생 광펄스가 나오게 되는 것이다. 이상의 결과로부터 단일 광펄스 응답을 얻기 위한 주입전류의 반복율은 어떤 문턱치 이하로 제한되어야 함을 알 수 있다.

이번에는 주입전류의 펄스폭이 100ps 인 경우를 고려하기로 한다. 최대 반복율은 50kHz 까지 증가시키며 모의전산하였고 그 결과를 그림 8에 나타내었다.

그림 7에서 보는 바와 같이 주입전류의 펄스폭이 100ps 인 경우에는 200ps 인 경우와는 달리 두 번째 펄스는 발생하지 않는다. 즉 주입전류의 펄스폭이 적당히 짧게 주어지면 일단 광펄스를 발생시킨 전자밀도가 다시 증가하는 부분이 없으므로 반복율이 증가해도 두 번째 기생 광펄스는 발생하지 않는다. 그림 7에

서 실선으로 나타낸 영역은 단일 광펄스를 보이는 정상적인 응답을 나타내며 점선 부분은 광펄스의 주기가 두 배가 되는 period doubling 현상^[13]이 일어난 영역을 나타낸다.

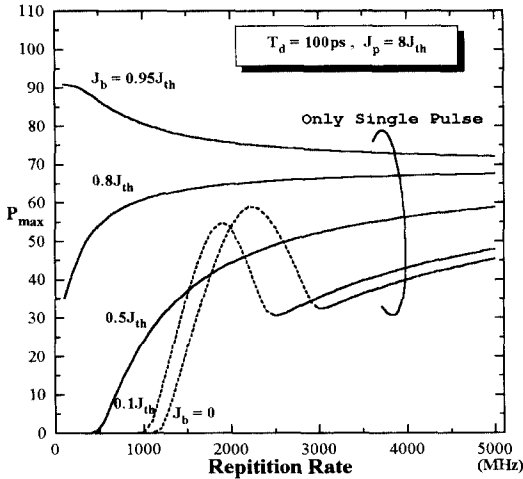


그림 7. 주입전류의 반복율의 증가에 따른 광펄스 응답 $T_d = 100\text{ps}$, $J_p = 8J_{th}$ 실선 : 정상적인 응답, 점선 : Period doubling 응답

Fig. 7. Optical pulse response as a function of repetition rate of injected current. $T_d = 100\text{ps}$, $J_p = 8J_{th}$ Solid line : Normal response, Dotted line : Period doubling response.

2. Period Doubling 현상

그림 7에서 바이어스 전류가 0, $0.1J_{th}$ 와 같이 작은 경우에, 반복율의 증가에 따라 광펄스의 크기가 급격하게 증가하다 감소하는 특이한 부분을 볼 수 있다. 이 영역에서는 주입전류의 펄스가 두 번 반복될 때 비로소 한 개의 광펄스가 나타나는 period doubling 현상이 일어난다. 그림 8은 $T_d = 100\text{ps}$, $J_b = 0$, $J_p = 8J_{th}$ 인 경우, $RR = 2\text{GHz}$ 의 반복률에 대하여 period doubling 광펄스 응답의 시간 변화를 나타낸 그림이다.

주입전류에 의해 발생하는 광펄스는 전류에 의해 조절되는 전자밀도 n 의 크기에 의존한다. 즉 전자밀도 n 이 n_{th} 를 넘어서야만 광펄스 응답이 그에 상응하여 발생하게 된다. 그러나 위와 같이 바이어스 전류가 너무 낮거나 주입전류의 폭이 너무 좁은 경우에는, 전자밀도가 일정 수준인 n_{th} 이상으로 아주 미약하게 증가한 후 전류의 주입이 끝나게 되고 그로 인해 매우 미약한

광펄스가 발생하게 된다. 이렇게 미약한 광펄스를 발생시킨 전자밀도는 크게 떨어지지 않고 계속 축적되어 남아 있다가 다음 전류 펄스가 주입될 때 bias를 높여 주는 효과를 보이게 된다. 결국 다음 전류 펄스에 의해서야 전자밀도는 비로소 문턱전자밀도를 넘어서게 되고 광펄스를 발생시킨다. 이렇게 광펄스를 발생시킨 후 전자밀도는 급격하게 줄어들어 세 번째 전류펄스의 주입에는 문턱전자밀도를 넘지 못하고 네 번째 전류펄스에야 문턱치를 넘어 광펄스발생에 기여하게 된다. 이러한 현상은 반복되며 주입전류의 주기에 비하여 광펄스의 주기가 두 배가 늘어나는 period doubling 현상이 일어나게 된다.

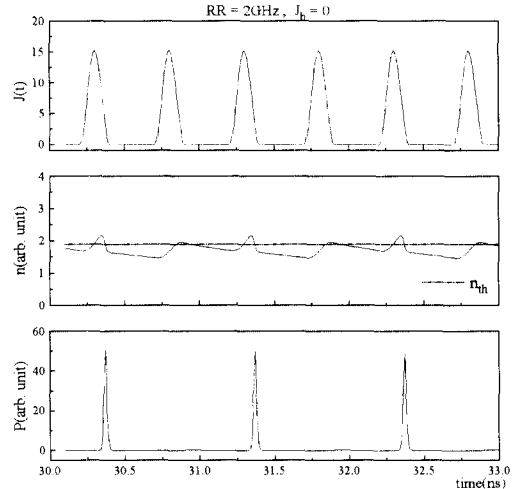


그림 8. 전형적인 period doubling 현상 $T_d = 100\text{ps}$, $RR = 2\text{GHz}$, $J_b = 0$, $J_p = 8J_{th}$

Fig. 8. Numerical result of typical period doubling phenomenon. $T_d = 100\text{ps}$, $RR = 2\text{GHz}$, $J_b = 0$, $J_p = 8J_{th}$.

V. 결 론

반도체 레이저에서 Gain-Switching에 의한 초단 광 펄스 발생에 관하여 고찰하였다. III장에서는 주입 전류의 바이어스 J_b 와 펄스 폭 T_d , 펄스 크기 J_p 에 따른 광 펄스 응답을 알아보았다. 주입전류의 펄스가 인가되어 전자밀도의 상승 및 하강 곡선을 유도하고 $n = n_{th}$ 가 되어 전자밀도의 적분치가 최대가 되는 순간 광펄스가 발생하는 것을 확인하였다. 이때 대체로 주입전류는 작으나마 계속되고 있으며 전자밀도 곡선은 일시 재상승하게 된다. 재상승 전자밀도의 최대치가

n_{th} 를 넘는 경우는 연속 광펄스를 일으키게 된다. 따라서 기생 광펄스가 없는 효율적인 광펄스를 얻기 위해서는 광펄스 발생 직후 전자밀도의 재상승을 억제하는 방향으로 $J(t)$ 의 파라미터 J_b , T_d , J_p 등을 조절해야 한다는 것을 알 수 있었다.

IV장에서는 주입 전류의 반복율 RR을 변화시켜가며 광펄스 응답을 살펴보았다. 비교적 넓은 펄스폭을 갖는 주입전류에 낮은 바이어스를 인가하여 단일 광펄스를 얻는 경우에도 반복율 RR을 증가시키면 다중 광펄스 응답이 나타나는 것을 관찰하였다. 이는 반복율의 증가에 따라 생성된 광펄스 이후 축적되는 전자밀도가 미세하게나마 증가한다는 사실에 기인함을 밝혔다. 비교적 좁은 펄스폭을 갖는 주입전류의 경우에는 반복율의 증가와 무관하게 단일 광펄스 응답을 얻으며, 바이어스 전류가 낮은 경우에는 적당한 RR에 대하여 오히려 period doubling 현상이 일어남을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] John AuYeung, "Picosecond optical pulse generation at gigahertz rates by direct modulation of a semiconductor laser," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 38, pp. 308-310, 1981.
- [2] John E. Bowers, Paul A. Morton, A. Mar, and Scott W. Corzine, "Actively mode-locked semiconductor lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-25, pp. 1426-1439, 1989.
- [3] Y. Silberberg and P. W. Smith, "Subpicosecond pulses from a mode-locked semiconductor laser," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-22, pp. 759-761, 1986.
- [4] P. J. Delfyett, C.-H. Lee, L. T. Florez, N. G. Stoffel, T. J. Gmitter, and N. C. Andreadakis, "Generation of subpicosecond high-power optical pulses from a hybrid mode-locked semiconductor laser," *Opt. Lett.* vol. 15, pp. 1371-1373, 1990.
- [5] Dong-Sun Seo and Ran-Sook Kim, "Wavelength-tunable transform-limited pulse generation from an injection-seeded gain-switched Fabry-Perot laser," *J. Electrical Engr. & Information Science*, vol. 1, No. 4, pp. 59-64, 1996.
- [6] H. F. Liu, Y. Ogawa, and S. Oshiba, "Generation of an extremely short single mode pulse(~ 2 ps) by fiber compression of a gain-switched pulse from a $1.3\mu\text{m}$ Distributed feedback laser diode," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 59, no. 11, pp. 1284-1286, Sept. 1991.
- [7] Marek Osinski and M. J. Adams, "Picosecond pulse analysis of gain-switched $1.55\mu\text{m}$ InGaAsP lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-21, pp. 1929-1936, 1985.
- [8] Patricia M. Downey, John E. Bowers, Rodney S. Tucker, and Edward Agyekum, "Picosecond dynamics of a gain-switched InGaAs laser," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-23, pp. 1039-1046, 1987.
- [9] Peter Paulus, Ralf Langenhorst, and Dieter Jäger, "Generation and optimal control of picosecond optical pulses from gain-switched semiconductor lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-24, pp. 1519-1522, 1988.
- [10] Govind P. Agrawal and Niloy K. Dutta, *Semiconductor Lasers*, New York, Van Nostrand Reinhold, 1993.
- [11] Hai-Feng Liu, Masashi Fukazawa, Yoshio kawai, and Takeshi Kamiya, "Gain-switched picosecond pulse(< 10 ps) generation from $1.3\mu\text{m}$ InGaAsP laser diodes," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-25, pp. 1417-1424, 1989.
- [12] 양동석, 한영진, 김창민, "외부 광귀환이 있는 레이저 다이오드의 혼돈특성," 한국광학회, 제5권, 제3호, pp. 394-402, 1994년 9월
- [13] Hai-Feng Liu and Wan Fung Ngai, "Nonlinear dynamics of a directly modulated $1.55\mu\text{m}$ InGaAsP distributed feedback semiconductor laser," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 29, no. 6, pp. 1668-1675, 1993.

 저 자 소 개

金 允 中(正會員)

1973년 10월 24일생. 1996년 서울시립대학교 전자공학과 졸업. 1996년 3월 ~ 현재 동 대학원 전자공학과 석사과정 재학중. 주관심분야는 도파/집적광학, 광필터, 고속 광변조기, BPM, FDM, FEM 등 수치해석 등임

金 東 珏(正會員)

1972년 9월 20일생. 1995년 서울시립대학교 전자공학과 졸업. 1997년 2월 동 대학원 전자공학과 공학석사. 1997년 2월 ~ 현재 삼성전자 재직중. 주관심분야는 도파/집적광학, 광섬유, FDM, FEM, BPM 등 수치해석 등임

金 昌 敏(正會員) 第 34卷 D編 第 1號 參照

현재 서울시립대학교 전자전기공학
부 정교수