

증폭된 광 귀환을 가지는 다중 전극 복소 결합 DFB 레이저에서 발생하는 self-pulsation 특성 해석

김상택 · 김태영 · 김부균[†]

승실대학교 정보통신전자공학부
Ⓣ 156-743 서울시 동작구 상도5동 1-1

임영안 · 박경현

한국전자통신연구원 기반기술연구소 광소자연구부
Ⓣ 대전시 유성구 가정동 161번지

(2005년 10월 4일 받음, 2005년 12월 15일 수정본 받음)

하나의 DFB 영역, 위상 조정 영역과 이득 영역으로 구성된 다중 전극 DFB 레이저의 pulsation 동작 특성을 살펴본다. Anti-phase (AP) complex-coupled (CC) DFB 구조를 사용한 경우가 in-phase CC DFB 구조나 index-coupled DFB 구조를 사용한 경우에 비하여 안정된 pulsation 동작이 발생하는 이득 영역과 위상 조정 영역의 전류 범위가 큼을 알 수 있다. AP CC DFB 구조를 사용한 경우 결합 세기가 커질수록, 이득 결합 계수가 커질수록 안정된 pulsation 동작이 발생하는 이득 영역의 전류 범위가 증가하고 pulsation 주파수의 튜닝 영역이 커짐을 볼 수 있다. 또한 위상 조정 영역의 위상 변화에 의한 pulsation 주파수의 튜닝 영역도 커짐을 볼 수 있다. 고정된 결합 세기에서 DFB 영역의 길이가 증가할수록 pulsation 동작이 발생하는 위상 조정 영역과 이득 영역의 전류 범위가 증가하여 pulsation 주파수 튜닝 영역이 넓어짐을 볼 수 있다.

주제어 : Self-pulsation, Multi-section DFB lasers, Optical feedback, High speed optical signal processing, All optical 3R regenerator.

1. 서 론

완전 광 3R 재생기와 같은 초고속 광 신호 처리 기술을 구현하기 위해서 입력 광 신호로부터 광 클락을 추출하는 기술에 대한 연구가 진행되고 있다. 입력 광 신호로부터 광 클락을 추출하기 위해서 모드락 레이저 다이오드^[1,2], 다중 전극 pulsating DFB 레이저^[3-5] 등이 널리 사용된다. 모드락 레이저 다이오드의 경우 pulsation 주파수의 튜닝 범위가 1 GHz 이하로 매우 작은 단점을 가지고 있다.^[6] 반면에 다중 전극 pulsating DFB 레이저는 주입 전류의 변화로 pulsation 주파수를 10 GHz 이상 연속적으로 튜닝할 수 있다는 장점을 가지고 있다.^[7,8]

두개의 DFB 영역과 하나의 위상 조정 영역으로 구성되는 다중 전극 DFB 레이저는 각각의 DFB 영역에서 발진하는 모드의 비팅에 인하여 pulsation 동작이 발생하고 pulsation 주파수는 두 모드의 주파수 차이로 주어진다.^[8] 따라서 이 경우 DFB 영역의 회절 격자를 서로 다른 두 영역에 제작하여야 하므로 제작 공정이 복잡하다. 또한 두 DFB 영역의 격자 주기의 차이에 따라 pulsation 동작 특성이 달라지므로 격자 주기를 정확히 조절해야 한다는 단점을 가지고 있다. 반면에 광 귀환을 가지는 다중 전극 DFB 레이저의 경우 하나의 DFB 영역, 이득 영역과 위상 조정 영역이 집적된 구조로서

상대적으로 제작 공정이 간단하다.^[4,7] DFB 영역에서 발진하는 모드는 전체 공진기의 단면에서 반사되어 이득 영역과 위상 조정 영역을 통과하여 다시 DFB 영역으로 귀환된다. 이러한 귀환된 광 필드에 의해 문턱 이득이 비슷하고 파장이 다른 두 개의 전체 공진기 모드가 유기되고 유기된 두 모드의 비팅에 의해 pulsation 동작을 하게 된다.^[4,7] 이 경우 이득 영역과 위상 조정 영역에 주입하는 전류에 의해 귀환된 광 필드의 세기와 위상을 각각 조절하여 pulsation 주파수를 연속적으로 조절할 수 있다.

최근에 index-coupled (IC) DFB 구조^[4]와 complex-coupled (CC) DFB 구조^[7]를 사용한 광 귀환을 가지는 다중 전극 DFB 레이저가 구현되었다. 본 논문에서는 광 귀환을 가지는 다중 전극 DFB 레이저가 IC DFB 구조를 사용한 경우와 CC DFB 구조를 사용한 경우에 발생하는 pulsation 동작 특성을 비교하였다. CC DFB 구조를 가지는 경우는 CC 회절 격자를 구성하는 index 회절 격자 성분과 gain 회절 격자 성분의 위상이 in-phase (IP) 인 경우와 anti-phase (AP) 인 경우의 pulsation 동작 특성을 비교하였다. 또한 여러 가지 결합 세기, 결합 계수 비, 공진기 길이 등이 pulsation 동작 특성에 미치는 영향을 살펴보았다. 세 가지 DFB 구조 중 AP CC DFB 구조를 사용한 경우가 다른 경우에 비하여 pulsation 동작이 발생하는 전류 범위가 넓고 pulsation 주파수의 튜닝 범위가 넓음을 볼 수 있었다.

[†]E-mail: bgkim@e.ssu.ac.kr

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 본 논문에 사용된 전산 모의 방법에 대하여 간략히 설명한다. 3장에서는 여러 형태의 광 귀환을 가지는 다중 전극 DFB 레이저에서 발생하는 pulsation 특성 결과를 제시하고 검토한다. 마지막으로 4장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 전산 모의 방법

다중 전극 DFB 레이저에서 pulsation 동작 특성을 살펴보기 위하여 시간 영역 모델을 사용하였다. 시간 영역 모델은 순방향으로 진행되는 필드와 역방향으로 진행되는 필드의 상호 결합 현상을 나타내는 시간 의존 결합 모드 방정식과, 광자와 상호 작용을 하는 캐리어의 밀도 변화를 나타내는 비율 방정식을 시간 영역에서 해석한 것으로 그 수식은 다음과 같다.^[9]

$$\begin{aligned} & \frac{1}{v_g} \frac{\partial a(z, t)}{\partial t} + \frac{\partial a(z, t)}{\partial z} \\ & = (g - \alpha - j\delta)a(z, t) - j\chi b(z, t) + F_a(z, t) \\ & \frac{1}{v_g} \frac{\partial b(z, t)}{\partial t} - \frac{\partial b(z, t)}{\partial z} \\ & = (g - \alpha - j\delta)b(z, t) - j\chi a(z, t) + F_b(z, t) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dN(z, t)}{dt} & = \frac{I}{qV} - AN(z, t) - BN^2(z, t) - CN^3(z, t) \\ & - \frac{v_g g_N(N(z, t) - N_0)S(z, t)}{1 + \epsilon S(z, t)} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $a(z, t)$ 와 $b(z, t)$ 는 각각 순방향과 역방향으로 진행하는 정규화된 slowly-varying 필드의 크기, χ 는 결합 계수 (DFB 영역), v_g 는 군속도, g 는 이득 계수, α 는 손실 계수, δ 는 레이저의 발진 파장이 브래그 파장으로부터 얼마나 벗어나 있는지는 나타내는 인자이다. 이득 계수 g 는 파장에 따라 변화한다. 이러한 이득 스펙트럼을 고려하기 위하여 디지털 필터 기법을 사용하였다.^[10] $F_a(z, t)$ 와 $F_b(z, t)$ 는 자발 방출 잡음으로 레이저 발진시에 구동원으로 동작한다. 비율 방정식에서 $N(z, t)$ 는 캐리어 밀도, I 는 주입 전류, A 는 선형 재결합 계수, B 는 자발 재결합 계수, C 는 오제 캐리어 재결합 계수, g_N 은 미분 이득, N_0 는 투명 캐리어 밀도, q 는 전자의 전하량, V 는 활성층 영역의 부피, ϵ 는 비선형 이득 억제 계수이고 $S(z, t)$ 는 광자 밀도로 $S(z, t) = (|a(z, t)|^2 + |b(z, t)|^2)/(v_g h\nu)$ 이다. 여기서 h 는 플랑크 (Planck) 상수이고 ν 는 주파수를 의미한다.

시간 영역과 공간 영역에서 결합 방정식과 비율 방정식의 수치 계산의 효율성과 정확성을 위해 연산자 분리 시 영역 모델^[9] 사용하였다. 시간 영역 모델을 사용하여 구한 결과로부터 출력 파워, 광 스펙트럼 및 RF 스펙트럼과 변조 지수 등을 구하였다. 또한 식 (1)과 (2)에서 $\partial/\partial t = 0$ 으로 하여 구한 정적 모델^[11]을 사용하여 동적 특성을 예측할 수 있었다.

본 논문에서 사용한 DFB 영역의 주입 전류는 주어진 결합 세기에서의 문턱 전류보다 30 mA 큰 전류이다. 위상 조정 영역에 주입되는 전류에 의해 굴절율이 변화되고 이에 따라 귀환되는 광 필드의 위상이 변화되므로 본 논문에서는 위상을 직접 0에서 2π 까지 변화시키면서 pulsation 동작 특성을 살펴보았다.^[12] 위상 조정 영역과 증폭 영역의 길이는 각각 $500\mu\text{m}$ 와 $300\mu\text{m}$ 이고 계산에 사용한 나머지 파라미터는 표 1과 같다.

III. 계산 결과 및 검토

그림 1은 계산에 사용된 증폭된 광 귀환을 가지는 다중 전극 DFB 레이저의 개념도이다. DFB 영역에서 출력되는 필드 E_{out} 은 오른쪽 단면에서 반사되어 증폭 영역과 위상 조정 영역을 통하여 다시 DFB 영역으로 입력된다. 따라서 입력되는 필드는 $E_{in}(t) = Ke^{j\phi}E_{out}(t - \tau)$ 이다. 여기서 K 는 DFB 영역에서 출력되는 필드 E_{out} 와 오른쪽 단면에서 반사되어 다시 DFB 영역으로 귀환되는 필드 E_{in} 의 크기의 비를 나타내며 ϕ 는 귀환되는 필드의 위상을 나타낸다. τ 는 위상 조정 영역

표 1. 계산에 사용된 파라미터

파라미터	값	단위	의미
d	0.1	μm	활성층 영역의 두께
w	2	μm	활성층 영역의 폭
n_e	3.32		유효 굴절율
n_g	3.7		군 굴절율
A	1	10^8 s^{-1}	선형 재결합 계수
B	1	$10^{-16} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	자발 재결합 계수
C	1	$10^{-40} \text{ m}^6 \text{ s}^{-1}$	오제(Auger) 캐리어 재결합 계수
α_H	4	m^{-1}	선폭 증가 계수
N_0	1.0	10^{24} m^{-3}	투명 캐리어 밀도
Γ	0.3		도파로 구속 계수
α_0	25×10^2		손실
g_N	2.7	10^{-20} m^{-2}	미분 이득
ϵ	3	10^{-23} m^3	비선형 이득 억제 계수

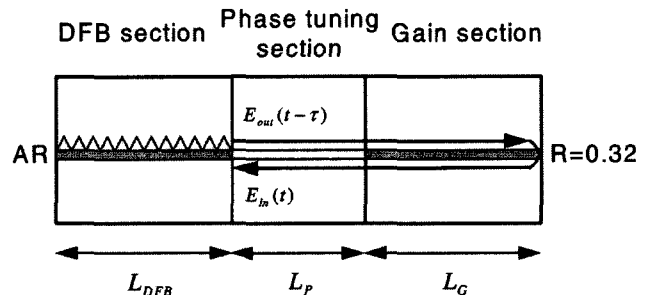


그림 1. 증폭된 광 귀환을 가지는 다중 전극 DFB 레이저의 개념도

과 증폭 영역을 한번 왕복하는데 걸리는 시간이다. 적절한 K 와 ϕ 에서 solitary DFB 레이저의 주 모드의 근처에 문턱 이득이 비슷한 두개의 전체 공진기 모드가 유기되고 이러한 두 모드의 비팅에 의하여 pulsation 동작이 발생하게 된다.^[4,7] 여기서 K 와 ϕ 는 각각 증폭 영역의 주입 전류와 위상 조정 영역의 주입 전류로서 조정되고 τ 는 위상 조정 영역과 증폭 영역의 길이에 의해 주로 결정된다.

그림 2는 DFB 영역의 길이가 $300\mu\text{m}$ 이고 결합세기 κL_{DFB} 가 $2-j0.2$ 일 때 여러 가지 K 값에 대하여 귀환된 광 필드의 위상을 변화시켜 가며 계산한 solitary DFB 레이저의 주 모드 근처에서 유기되는 전체 공진기 모드의 파장과 정규화된 문턱 이득을 나타낸다. 또한 귀환된 광 필드의 위상이 $\phi=0$ 일 때의 전체 공진기 모드의 파장과 문턱 이득은 기호로 나타냈다. 정규화된 문턱 이득은 주어진 K 와 귀환된 광 필드의 위상에서 경계 조건을 만족하는 전체 공진기 모드들이 발전하기 위해 필요한 이득을 의미한다. K 가 0.05로 매우 작은 경우 유기된 전체 공진기 모드의 자취는 DFB 레이저의 주 모드 근처에서 타원 모양을 가지고 위상에 따라 변화함을 알 수 있다. 이 경우 귀환된 광 필드에 의해 DFB 레이저의 주 모드 근처에 전체 공진기 모드가 하나만 존재하여 pulsation 동작이 발생하지 않는다. 그러나 K 가 0.1 보다 큰 경우 귀환된 광 필드에 의해 DFB 레이저의 주 모드 근처에 두 개의 전체 공진기 모드가 유기됨을 볼 수 있다. 이러한 문턱 이득이 비슷한 두개의 전체 공진기 모드가 유기되는 귀

환된 광 필드의 위상에서 모드 비팅에 의하여 pulsation 동작이 발생된다. 그림 2인 경우 모드 비팅에 의해 pulsation 동작이 발생하기 위해서는 K 가 0.1 이상이어야 한다. 또한 K 가 증가할수록 유기된 두개의 전체 공진기 모드의 파장 차이가 커짐을 알 수 있다. 따라서 pulsation 주파수가 증가하리라 예상된다. 그러나 K 가 너무 크게 되면 문턱 이득이 비슷한 여러 개의 전체 공진기 모드가 발전하게 되어 매우 혼잡한 형태의 출력 파형이 발생하리라 예상된다.

그림 3은 귀환된 필드의 세기 K 가 0.6 일 때 여러 가지 결합 세기에 대하여 귀환된 광 필드의 위상에 따른 전체 공진기 모드의 자취를 보인다. 결합 세기가 작아질수록 정규화된 문턱 이득이 커지고 금지대역 폭이 감소함을 알 수 있다. 또한 귀환된 필드에 대한 영향이 상대적으로 커서 solitary DFB 레이저의 주 모드 근처에서 문턱 이득이 비슷한 여러 개의 전체 공진기 모드가 존재함을 알 수 있다. 반면에 결합 세기가 큰 경우 전체 공진기 모드의 자취에서 peak와 valley의 문턱 이득 차이가 커서 귀환된 필드에 대한 영향이 상대적으로 작게 나타남을 알 수 있다. 결합 세기가 작아질수록 solitary DFB 레이저의 주 모드 근처에 존재하는 두 개의 전체 공진기 모드와 다른 전체 공진기 모드의 문턱 이득 차이가 작아짐을 알 수 있다. 이러한 경우는 pulsation 동작이 발생하지 않고 다중 모드 발전에 의해 매우 혼잡한 형태의 출력 파형이 나타나리라 예상된다. 결합 세기가 커질수록 모드 비팅에 기여하는 두 개의 전체 공진기 모드와 다른 전체 공진기 모드의 문턱 이득 차이가 증가하여 안정된 pulsation 동작이 발생하는 귀환된 광 필드의 세기와 위상 범위가 증가하리라 예상된다. 또한 결합 세기가 증가할수록 전체 공진기 모드의 자취에서 solitary DFB 레이저의 주 모드 근처에 좁

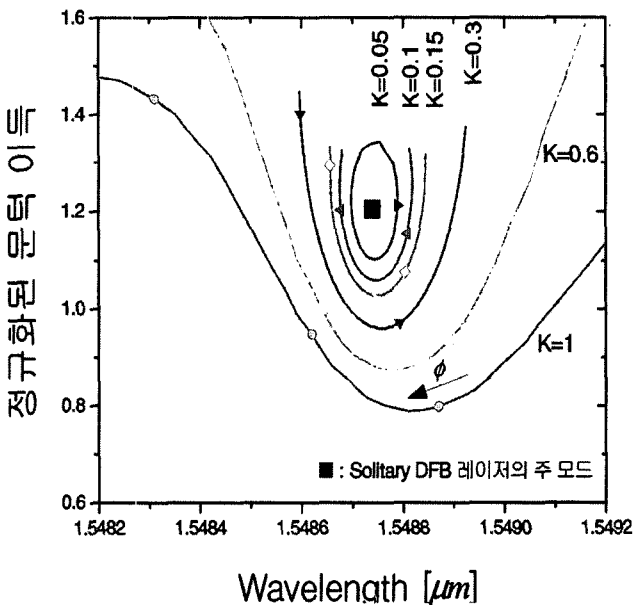


그림 2. 여러 가지 K 값에 대하여 귀환된 광 필드의 위상을 변화시켜 가며 계산한 solitary DFB 레이저의 주 모드 근처에서 유기되는 전체 공진기 모드의 자취 (실선)와 귀환된 광 필드의 위상이 고정 ($\phi=0$) 되었을 때의 전체 공진기 모드의 위치 (기호). $\kappa L_{DFB}=2-j0.2$, $L_{DFB}=300\mu\text{m}$.

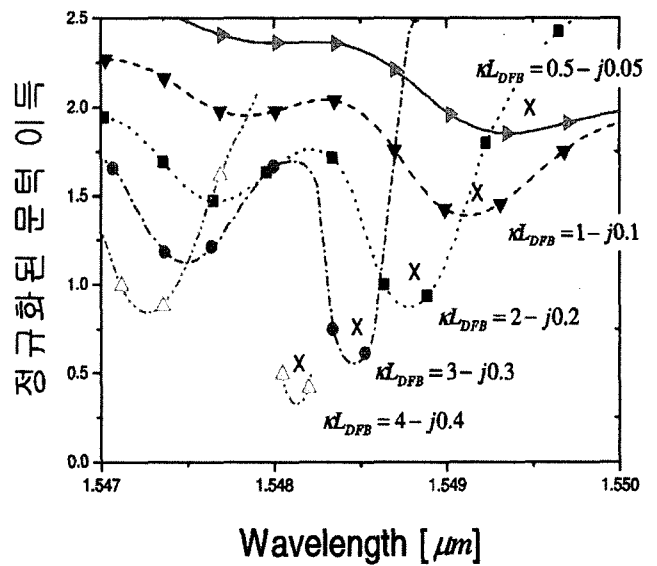


그림 3. $K=0.6$ 일 때 여러 가지 결합 세기에 대하여 귀환된 광 필드의 위상에 따른 전체 공진기 모드의 자취. x: 각각의 결합 세기에서 solitary DFB 레이저의 주 모드의 위치.

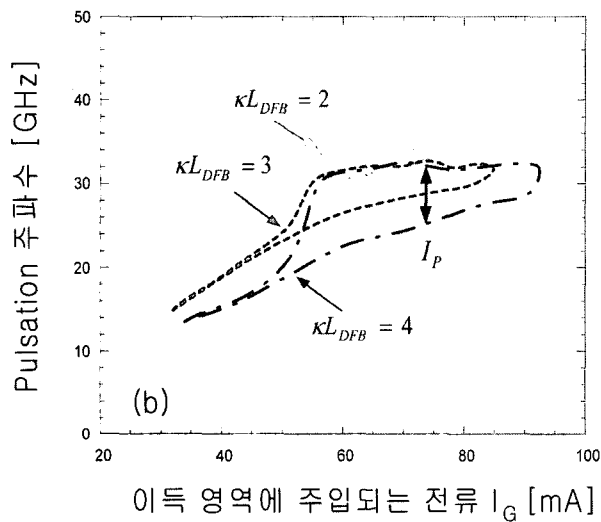
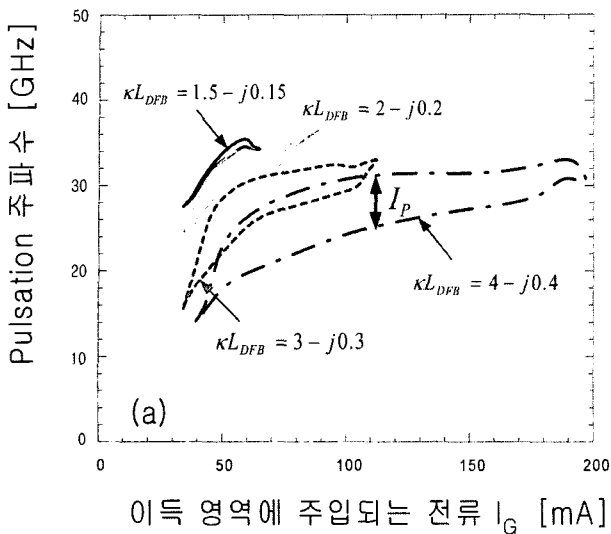


그림 4. 여러 가지 결합 세기에 대하여 이득 영역에 주입되는 전류 I_G 와 위상 조정 영역에 주입 되는 전류 I_P 에 따른 pulsation 주파수. $L_{DFB} = 300\mu m$. (a) AP CC DFB 구조를 가지는 경우, (b) IC DFB 구조를 가지는 경우.

은 valley가 형성되어 두 모드의 파장 차이가 감소한다. 따라서 pulsation 주파수가 감소하리라 예상된다.

그림 4(a)와 4(b)는 각각 AP CC DFB 구조와 IC DFB 구조를 사용한 경우 여러 가지 결합 세기에 대하여 이득 영역에 주입되는 전류 I_G 와 위상 조정 영역에 주입 되는 전류 I_P 에 따른 pulsation 주파수를 나타내는 그림이다. 위상 조정 영역의 주입 전류에 의해 위상 조정 영역의 유효 굴절률이 변화하여 귀환되는 광 필드의 위상이 변화한다. 본 논문에서는 위상 조정 영역에 주입되는 전류를 대신하여 귀환된 광 필드의 위상을 0에서 2π 까지 변화시켰다. 증폭 영역의 전류가 증가하면 귀환된 광 필드의 세기 K 가 증가한다. 따라서 증폭 영역의 전류가 증가함에 따라 pulsation 주파수가 증가하였

다. 이러한 pulsation 특성은 정적 모델로 구한 그림 2의 K 값에 따른 전체 공진기 모드의 자취로부터 예측할 수 있다.

결합 세기가 커질수록 고정된 광 귀환의 세기에 대하여 pulsation 주파수는 대체적으로 감소하였으나, pulsation 동작이 발생하는 이득 영역의 전류 범위는 증가하였다. 그 이유는 결합 세기가 커질수록 그림 3에서 볼 수 있듯이 solitary DFB 레이저의 주 모드 근처에 형성되는 valley 모양의 전체 공진기 모드 자취가 좁고 깊어지게 된다. 따라서 결합 세기가 커질수록 고정된 이득 영역의 전류에서 (예를 들어 그림 4(a)와 4(b)에서 $I_G \approx 60mA$) pulsation 주파수가 감소하였으나 위상 조정 영역의 위상 범위가 증가하여 위상 변화에 따른 pulsation 주파수 튜닝 영역이 증가함을 볼 수 있다. 또한 결합 세기가 커질수록 pulsation 동작이 발생하는 이득 영역의 전류 범위는 증가하여 pulsation 주파수의 튜닝 영역이 증가함을 알 수 있다.

결합 세기가 너무 작게 되면 DFB 레이저의 주 모드 근처에서 여러 개의 전체 공진기 모드가 발진하게 되어 안정된 pulsation 동작이 발생하는 이득 영역과 위상 조정 영역의 전류 범위가 작게 나타났다. 본 계산에서는 AP CC DFB 구조를 사용한 경우 결합 세기가 1.5- $j0.15$ 이상에서, IC DFB 구조를 사용한 경우 결합 세기가 2 이상에서 pulsation 동작이 발생하였다.

그림 4(a)와 4(b)에서 볼 수 있듯이 AP CC DFB 구조를 사용한 경우가 IC DFB 구조를 사용한 경우에 비하여 pulsation 동작이 발생하는 이득 영역의 전류 범위가 큼을 알 수 있다. IC DFB 구조를 사용하는 경우 문턱 전류에서 장파장 모드와 단파장 모드의 문턱 이득이 동일하여 모드 degeneracy 현상이 발생한다. 그러나 문턱 전류 이상에서는 spatial hole burning 현상에 의해 장파장 모드에 비해 단파장 모드의 문턱 이득이 약간 작아 귀환된 광 필드에 의해 단파장 모드 근처에 유기되는 두 개의 전체 공진기 모드에 의해 pulsation 동작이 발생된다. 그러나 단파장 모드와 장파장 모드 근처에서 유기되는 전체 공진기 모드의 문턱 이득이 동일하게 되는 귀환된 광 필드의 크기와 위상이 존재하게 되어 혼잡한 형태의 출력 파형이 발생하게 된다. 따라서 안정된 pulsation 동작이 발생하는 전류 범위가 작아지게 된다. 반면에 AP CC DFB 구조를 사용하는 경우 단파장 모드가 장파장 모드에 비해 문턱 이득이 작아 단파장 모드 근처에서 유기되는 두 개의 전체 공진기 모드에 의해 안정된 pulsation 동작이 발생하게 된다. 따라서 그림 4(a)의 AP CC DFB 구조를 사용하는 경우가 그림 4(b)의 IC DFB 구조를 사용하는 경우에 비하여 pulsation 동작이 발생하는 전류의 범위가 큼을 알 수 있다.

그림 5는 index 회절격자 성분에 의한 결합 세기가 3일 때 여러 가지 이득 결합 계수(x_g)에 대하여 이득 영역과 위상 조정 영역에 주입되는 전류에 따른 pulsation 주파수를 나타낸다. AP CC DFB 구조를 사용한 경우 ($x_g < 0$ 인 경우)는 단파장 모드 근처에서, IC DFB 구조를 사용한 경우 ($x_g > 0$ 인 경우)는 장파장 모드 근처에서 유기된 두 개의 전체

공진기 모드의 비팅으로 pulsation 동작이 발생한다. AP CC 회절격자인 경우 $|x_g|$ 가 증가할수록 단파장 모드와 장파장 모드의 문턱 이득 차이가 증가한다. 이러한 경우 귀환된 광 필드의 세기가 큰 경우에도 단파장 모드 근처에서 유기된 두 개의 전체 공진기 모드의 문턱 이득이 다른 전체 공진기 모드의 문턱 이득에 비해 작아 안정된 pulsation 동작이 발생한다. 따라서 그림 5에서 볼 수 있듯이 AP CC 회절격자인 경우 $|x_g|$ 가 증가할수록 pulsation 동작이 발생하는 이득 영역의 전류 범위가 증가하고 pulsation 주파수 튜닝 범위도 넓어짐을 볼 수 있다. 반면에 IP CC 회절격자인 경우 pulsation 동작이 발생하는 위상 조정 영역과 이득 영역의 전류 범위가 매우 작음을 볼 수 있다. 그 이유는 IP CC DFB 레이저는 문턱 전류 이상에서 standing wave 효과로 인하여 이득 마진이 증가하여 동작 특성이 더욱 안정화되기 때문이라 생각된다.^[13,14] 따라서 IP CC DFB 구조를 사용한 다중 전극 DFB 레이저인 경우 solitary IP CC DFB 레이저의 주 모드 근처에 귀환된 광 필드에 의해 매우 좁고 깊은 valley 모양의 전체 공진기 모드의 자취가 형성되리라 예상할 수 있다. 이 경우 solitary DFB 레이저 주 모드 근처에 한 개의 전체 공진기 모드만 존재하여 pulsation 동작이 발생하지 않고 단일 모드 동작이 발생하게 된다.

IP CC DFB 구조를 사용한 경우와 AP CC DFB 구조를 사용한 경우 위상 조정 영역의 위상에 따른 발진 파장을 구함으로써 전체 공진기 모드의 자취에서 solitary DFB 레이저의 주 모드 근처에 발생하는 전체 공진기 모드의 valley 폭을 근사적으로 예상할 수 있다. 그림 6은 위상 조정 영역의 위상 변화에 따른 발진 파장을 나타내는 그림이다. 삽입된 그림은 각각 구해진 발진 파장으로부터 구한 solitary DFB 레이저의

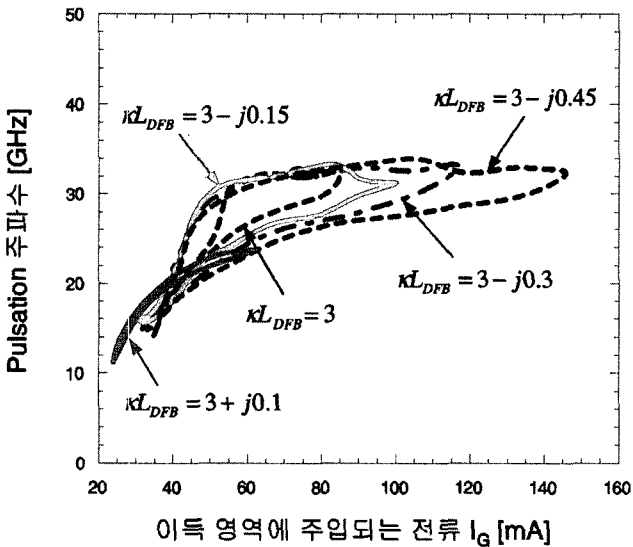


그림 5. 여러 가지 이득 결합 계수 (x_g)에 대하여 이득 영역에 주입되는 전류 I_G 와 위상 조정 영역에 주입 되는 전류 I_P 에 따른 pulsation 주파수. $L_{DFB} = 300\mu m$.

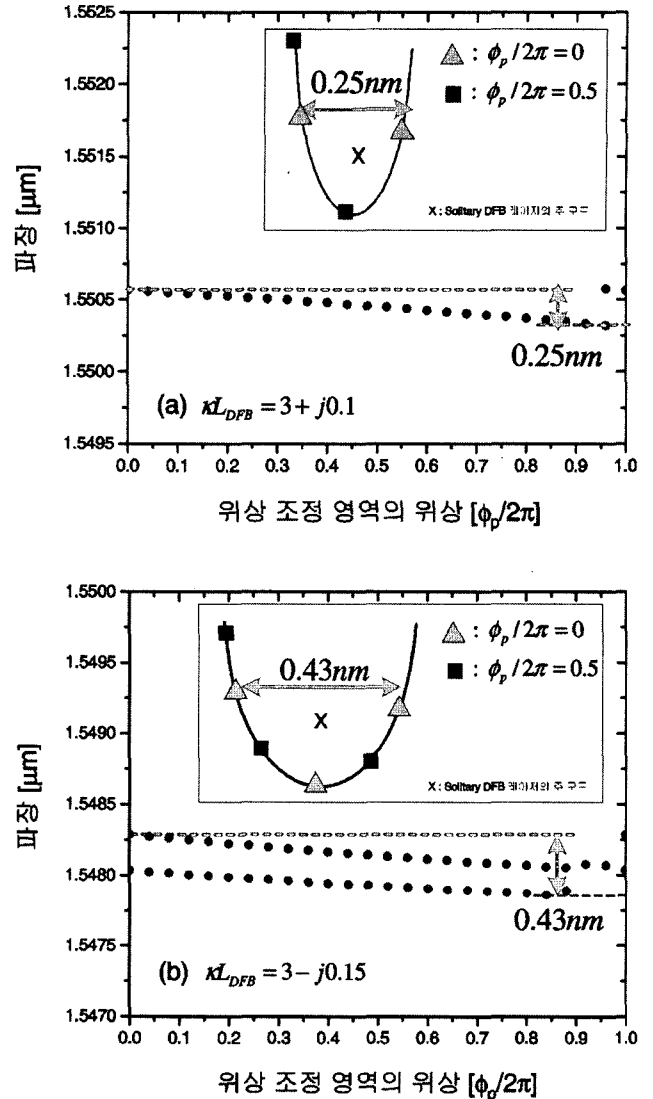


그림 6. 위상 조정 영역의 위상 변화에 따른 발진 파장. (a) $\kappa L_{DFB} = 3 + j0.1$ ($I_G = 50mA$), (b) $\kappa L_{DFB} = 3 - j0.15$ ($I_G = 60mA$).

주 모드 근처에서의 전체 공진기 모드의 자취와 위상 조정 영역의 특정 위상 값에서 전체 공진기 모드의 파장과 문턱 이득을 나타내는 그림이다. 그림 6(a)는 κL_{DFB} 가 $3 + j0.1$ 인 경우로서 위상 조정 영역의 대부분의 위상 값에서 pulsation 동작이 발생하지 않고 단일 모드 발진이 발생함을 볼 수 있다. 위상 조정 영역의 위상 변화에 따른 발진 파장의 변화는 약 0.25 nm 이다. 즉 그림 6(a)에 삽입된 그림과 같이 전체 공진기 모드 자취에서 valley 폭이 약 0.25 nm로 이러한 폭 내에 존재하는 전체 공진기 모드는 특정 위상에 대하여 하나만 존재한다. 따라서 위상 조정 영역의 대부분의 위상 값에서 단일 모드 동작을 하게 된다. 반면에 그림 6(b)는 κL_{DFB} 가 $3 - j0.15$ 인 경우로서 위상 조정 영역의 대부분의 위상 값에서 두 개의 모드가 발진되며 이러한 두 모드의 비팅에

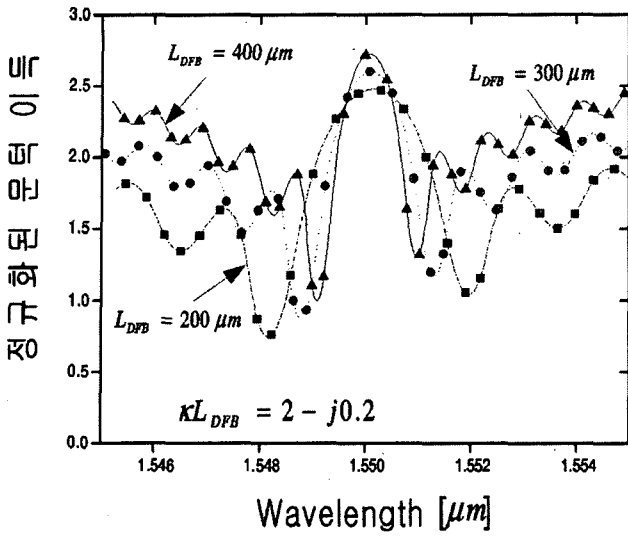


그림 7. 결합 세기가 $2-j0.2$ 이고 K 가 0.6일 때 여러 가지 DFB 영역의 길이에 대하여 귀환된 광 필드의 위상을 변화시켜가며 계산한 전체 공진기 모드의 자취.

의해 pulsation 동작이 발생함을 알 수 있다. 위상 조정 영역의 위상 변화에 따른 두 모드의 발진 파장의 변화 폭은 약 0.43 nm 이다. κL_{DFB} 가 $3-j0.15$ 인 경우 그림 6(a)인 경우에 비하여 전체 공진기 모드 자취에서 valley 폭이 넓어짐을 볼 수 있다. 또한 그림 6(b)의 삽입된 그림에서 보듯이 $\phi_p/2\pi$ 가 0.5인 경우 문턱 이득이 비슷한 두 개의 전체 공진기 모드가 유기되고 이러한 두 모드에 의해 pulsation 동작이 발생함을 알 수 있다.

그림 7은 결합 세기가 $2-j0.2$ 이고 K 가 0.6일 때 여러 가지 DFB 영역의 길이에 대하여 귀환된 광 필드의 위상을 변화시켜가며 계산한 전체 공진기 모드의 자취를 보인다. DFB 영역의 길이가 커질수록 (결합 계수 κ 가 작아질수록) 주 모드의 문턱 이득이 커짐을 볼 수 있다. 또한 전체 공진기 길이가 증가하여 귀환된 광 필드에 의해 유기되는 전체 공진기 모드의 파장 간격이 감소하여 주 모드 근처에 상대적으로 좁고 깊은 valley가 형성되어 주 모드 근처에 유기되는 문턱 이득이 비슷한 두 개의 전체 공진기 모드의 파장 차이가 감소함을 알 수 있다. 따라서 고정된 결합 세기에서 DFB 영역의 길이가 커질수록 유기되는 두 모드에 의해 발생하는 pulsation 주파수가 작아지고 보다 안정된 pulsation 동작을 하리라 예상된다.

그림 8은 결합 세기가 $2-j0.2$ 일 때 여러 가지 DFB 영역의 길이에 대하여 이득 영역과 위상 조정 영역의 전류에 따른 pulsation 주파수를 나타내는 그림이다. DFB 영역의 길이가 커질수록 그림 7에서 볼 수 있듯이 solitary DFB 레이저의 주 모드 근처에 상대적으로 좁고 깊은 valley 형태의 전체 공진기 모드의 자취가 유기된다. 따라서 pulsation 주파수의 크기는 감소하나 pulsation 동작이 발생하는 위상 조정 영역과 이득 영역의 전류 범위가 증가하며 pulsation 주파수 튜닝

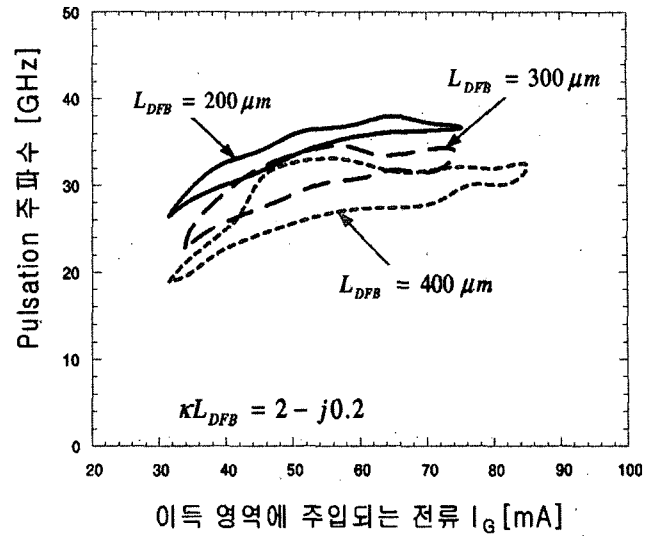


그림 8. 결합 세기가 $2-j0.2$ 일 때 여러 가지 DFB 영역의 길이에 대하여 이득 영역에 주입되는 전류 I_G 와 위상 조정 영역에 주입 되는 전류 I_P 에 따른 pulsation 주파수.

영역이 커짐을 볼 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 하나의 DFB 영역, 위상 조정 영역과 이득 영역으로 구성된 다중 전극 DFB 레이저에서 pulsation 동작 특성을 살펴보았다. AP CC DFB 구조를 사용한 경우가 IP CC DFB 구조나 IC DFB 구조를 사용한 경우에 비하여 안정된 pulsation 동작이 발생하는 이득 영역과 위상 조정 영역의 전류 범위가 크을 알 수 있었다. 정적 모델로 구한 결과로부터 pulsation 동작 특성을 예측할 수 있었고 시간 영역 모델을 이용하여 이러한 pulsation 동작 특성을 확인하였다.

Pulsation 동작이 발생되기 위해서는 적절한 광 필드의 귀환이 요구되었다. 귀환된 광 필드의 세기가 너무 작으면 solitary DFB 레이저의 주 모드 근처에 하나의 전체 공진기 모드만이 유기되어 pulsation 동작이 발생되지 않았고 너무 크면 다중 모드 발진으로 혼잡한 형태의 출력이 나타났다. 이득 영역의 전류가 증가하게 되면 귀환되는 광 필드의 세기가 커져 pulsation 주파수가 증가하였다. 발생 가능한 최대 pulsation 주파수는 전체 공진기의 길이에 의해 주어지는 페브리 페롯 모드의 간격에 해당되는 주파수이며 이득 영역의 전류가 증가할수록 이 주파수에 접근하였다.

AP CC DFB 구조를 사용한 경우 결합 세기가 커질수록, 이득 결합 계수가 커질수록 모드 비팅이 발생하는 두 개의 전체 공진기 모드와 다른 모드와의 이득 차이가 커져 안정된 pulsation 동작이 발생하는 이득 영역의 전류 범위가 증가하고 pulsation 주파수의 튜닝 영역이 커짐을 볼 수 있었다. 또한 위상 조정 영역의 위상 변화에 의한 pulsation 주파수의 튜닝 영역도 커짐을 볼 수 있었다.

고정된 결합 세기에서 DFB 영역의 길이가 커질수록 pulsation 동작이 발생하는 위상 조정 영역과 이득 영역의 전류 범위가 증가하여 pulsation 주파수 튜닝 영역이 넓어짐을 볼 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국전자통신연구원, 한국과학재단 목적기초연구(R01-2003-000-10231-0)와 광주과학기술원초고속광네트웍연구원연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

[1] B. K. Mathason and P. J. Delfyett, "Pulsed injection locking dynamics of passively mode-locked external-cavity semiconductor laser systems for all-optical clock recovery," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 18, pp. 1111-1120, 2000.

[2] R. Ludwig, A. Ehrhard, W. Pieper, E. Jahn, N. Agrawal, H.-J. Ehrke, L. Kuller, and H. G. Weber, "40 Gbit/s demultiplexing experiment with 10GHz all-optical clock recovery using a modelocked semiconductor laser," *Electron. Lett.*, vol. 32, no. 4, pp. 327-329, 1996.

[3] C. Bornholdt, S. Bauer, M. Mohrle, H.-P. Nolting, and B. Sartorius, "All optical clock recovery at 80GHz and beyond," *ECOC2001*, Th.F.1.2, Amsterdam, Netherlands, 2001.

[4] O. Brox, S. Bauer, M. Radziunas, M. Wolfrum, J. Sieber, J. Kreissl, B. Sartorius, and H.-J. Wunsche, "High-frequency pulsations in DFB-lasers with amplified feedback," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 39, no. 11, pp. 1381-1387, 2003.

[5] W. Mao, X. Wang, M. Al-Mumin, and G. Li, "40 Gbit/s all-optical clock recovery using two-section gain-coupled DFB laser and semiconductor optical amplifier," *Electron. Lett.*, vol. 37, no. 21, pp. 1302-1303, 2001.

[6] I. Ogura, H. Kurita, T. Sasaki, and H. Yokoyama, "Precise operation-frequency control of monolithic mode-locked laser diodes for high-speed optical communication and all-optical signal processing," *Opt. Quantum Electron.*, vol. 33, pp. 709-725, 2001.

[7] Dae-Su Yee, Young Ahn Leem, Sung-Bock Kim, Dong Churl Kim, Kyung Hyun Park, Sang-Taek Kim, and Boo-Gyoun Kim, "Loss-coupled DFB lasers with amplified optical feedback for optical microwave generation," *Opt. Lett.*, vol. 29, no. 19, pp. 2243-2245, 2004.

[8] M. Mohrle, B. Sartorius, C. Bornholdt, S. Bauer, O. Brox, A. Sigmund, R. Steingrüber, M. Radziunas, and H.-J. Wunsche, "Detuned grating multisection-RW-DFB lasers for high-speed optical signal processing," *IEEE J. Select. Topics on Quantum Electron.*, vol. 7, no. 2, pp. 217-223, 2001.

[9] B.-S. Kim, Y. Chung, and J.-S. Lee, "An Efficient Split-Step Time-Domain Dynamic Modeling of DFB/DBR Laser Diodes," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 36 no. 7, pp. 787-794, 2000.

[10] J. E. Carroll, J. Whiteaway, and D. Plumb, *Distributed feedback semiconductor lasers*, SPIE, London, Ch. 7, 1998.

[11] Hong-Seok Lee, Hong Kuk Kim, Boo-Gyoun Kim, and Byoung-ho Lee, "Systematic Comparisons of the Effects of the Linewidth Enhancement factor, the Confinement factor, the Internal loss and the Cavity length on the Above Threshold Characteristics of Quarter Wavelength Shifted DFB Lasers," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 27, no. 6, pp. 396-400, 2000.

[12] 김상택, 김태영, 지성근, 김부균, "다중 전극 index-coupled DFB 레이저에서 결합 세기 및 각 영역의 길이가 self-pulsation 동작 특성에 미치는 영향," *한국광학회지*, vol. 16, no. 1, pp. 85-98, 2005.

[13] B. Jonsson, A. J. Lowery, H. Olesen, and B. Tromborg, "Instabilities and nonlinear L-I characteristics in complex-coupled DFB lasers with antiphase gain and index gratings," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 32, pp. 839-850, 1996.

[14] Sang-Taek Kim and Boo-Gyoun Kim, "Analysis of single mode yields above threshold for complex-coupled distributed feedback lasers with asymmetric facet reflectivities," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 22, no. 5, pp. 1010-1015, 2005.

Analysis of Self-Pulsation Characteristics in Multi-Section Complex-Coupled DFB Lasers With Amplifying Optical Feedback

Sang-Taek Kim, Tae-Young Kim and Boo-Gyoun Kim[†]

School of Electronic Engineering, Soongsil University, Seoul, Korea

Young Ahn Leem and Kyung Hyun Park

Optical Devices Research Department, ETRI, Daejeon, Korea

[†]*E-mail: bgkim@e.ssu.ac.kr*

(Received October 4, 2005, Revised manuscript December 15, 2005)

We investigate the pulsation characteristics in a multi-section DFB laser which is composed of one DFB section, phase tuning section, and gain section. Multi-section DFB lasers with anti-phase (AP) complex-coupled (CC) DFB structure show wide current ranges of gain and phase tuning sections for stable pulsations compared to those with in-phase CC DFB structure or index-coupled DFB structure. For multi-section DFB lasers with AP CC DFB structure, the current range of a gain section for stable pulsations increases and the tuning range of the pulsation frequency increases as a coupling strength or a gain coupling coefficient increases. Also, the tuning range using the phase variation in a phase tuning section increases. For a fixed coupling strength, the current ranges of gain and phase tuning sections for stable pulsations increase and the tuning range of the pulsation frequency increases as the length of a DFB section increases.

OCIS Codes : 140.3490, 140.5960, 140.2020.