

다중 전극 Index-Coupled DFB 레이저에서 결합 세기 및 각 영역의 길이가 Self-Pulsation 동작 특성에 미치는 영향

김상택 · 김태영 · 지성근 · 김부균[†]

승실대학교 정보통신전자공학부

Ⓣ 156-743 서울시 동작구 상도5동 1-1

(2004년 10월 13일 받음, 2005년 1월 27일 수정본 받음)

두 개의 DFB 영역과 위상 조정 영역으로 구성된 다중 전극 index-coupled DFB 레이저에서 self-pulsation 동작 특성을 수치 해석으로 분석하였다. 금지 대역폭 내에 존재하는 전체 공진기 모드 수가 감소할수록 두 DFB 영역의 브래그 파장 차이인 $\Delta\lambda_B$ 가 변화할 때 발진 모드의 호핑이 발생하는 경우의 수가 적어져 pulsation 주파수가 불연속적으로 변화하는 경우의 수가 감소한다. 또한 고정된 $\Delta\lambda_B$ 에 대하여 위상 조정 영역의 위상이 변화할 때 pulsation 주파수가 연속적으로 변화한다. 결합 세기와 위상 조정 영역의 길이가 고정되어 있을 때 금지 대역폭 내에 존재하는 전체 공진기 모드의 수는 DFB 영역의 길이가 길수록 감소한다. 반면에 DFB 영역의 결합 세기와 길이가 고정되어 있을 때 금지 대역폭 내에 존재하는 전체 공진기 모드의 수는 위상 조정 영역의 길이가 작을수록 감소한다. 따라서 결합 세기 및 각 영역의 길이를 적절히 조정하면 $\Delta\lambda_B$ 또는 위상 조정 영역의 위상이 변화하여도 모드 호핑이 발생하지 않아 안정된 pulsation 동작을 얻을 수 있음을 보였다.

주제어 : pulsation DFB lasers, self-pulsations, multi-section DFB lasers, optical generation of millimeter waves.

I. 서 론

입력 광 신호로부터 광 클락을 추출하는 기술은 완전 광 3R(Retiming, Reshaping, Reamplification) 재생기와 같은 초고속 광 신호 처리에 필요한 핵심적인 기술이다.^[1,2] 완전 광 클락 추출 방법으로 모드락 레이저를 사용하는 방법과^[3] 다중 전극 DFB 레이저에서 self-pulsation 현상을 이용하는 방법^[4] 등이 있다. 모드락 레이저에서 발생하는 pulsation 주파수는 레이저의 공진기 길이에 의해서 결정되고 주파수 튜닝 범위가 1 GHz 이하로 작기 때문에 공진기의 길이를 정확하게 조절해야 한다는 단점을 가지고 있다.^[5] 반면에 다중 전극 DFB 레이저는 모드락 레이저에 비하여 구조가 간단하고 주입 전류에 의해서 튜닝되는 pulsation 주파수 범위가 매우 크다는 장점을 가지고 있다.^[6,7]

다중 전극 DFB 레이저에서 self-pulsation 현상을 발생시키는 방법으로는 dispersive self-Q-switching(DSQS),^[8] self-mode locking^[9]과 모드 비팅^[7] 등이 있다. DSQS 현상은 한쪽 DFB 영역은 레이저로 다른쪽 DFB 영역은 반사기로 동작할 때 레이저에서 발진하는 모드의 파장이 반사기 영역의 반사 스펙트럼의 부 기울기 영역(파장이 증가함에 따라 반사율이 감소하는 영역)에 존재하면 pulsation 동작이 발생한다. 이러한 경우 다중 전극 DFB 레이저는 단일 모드로 동작하나 최대 pulsation 주파수는 relaxation oscillation 주파수에 의해 약 20 GHz 이하로 제한된다.^[10] Self-mode locking의 경우 하나의

DFB 영역과 광 귀환의 크기와 위상을 조정하는 이득 영역과 위상 조정 영역이 집적된 구조로서 적절한 광 귀환의 크기와 위상을 가질 때 pulsation 동작이 발생한다.^[9] 모드 비팅의 경우 두 DFB 영역이 모두 레이저로 동작하여 각각의 DFB 영역에서 발진 모드가 존재한다. 이러한 발진 모드는 서로 상호 작용을 하며 두 발진 모드의 파장 차이에 해당되는 주파수로 pulsation 동작을 하게 된다.

본 논문에서는 기존에 발표되었던 다중 전극 DFB 레이저에서 발생하는 pulsation 동작 특성을 금지 대역폭 내에 존재하는 전체 공진기 모드 수의 관점에서 해석하였다. 특히 다중 전극 DFB 레이저에서 두 DFB 영역의 브래그 파장 차이인 $\Delta\lambda_B$ 에 따라 발생하는 모드 호핑과 위상 조정 영역의 위상 변화에 따라 발생하는 모드 호핑을 금지 대역폭 내에 존재하는 전체 공진기 모드 수의 관점에서 해석하고 또한 pulsation 동작 특성을 예측하였다.

다중 전극 DFB 레이저에서 두 DFB 영역의 반사 스펙트럼의 금지 대역이 서로 중첩되어 있지 않는 경우 각각의 DFB 영역의 발진 모드는 spatial hole burning(SHB) 효과, 내부에서 반사되는 필드, 이득 분산 등에 의해 영향을 받는다.^[11] 또한 단파장 모드와 장파장 모드 사이에 모드 호핑이 발생하여 pulsation 주파수의 급격한 변화를 초래한다. 반면에 두 DFB 영역의 반사 스펙트럼의 금지 대역이 서로 중첩되어 있는 경우 각각의 DFB 영역에서는 단파장 모드와 장파장 모드 중에 다른 DFB 영역의 금지 대역 내에 존재하는 모드가 발진하게 된다. 따라서 금지 대역폭이 서로 중첩되지 않는 경우에 비하여 안정된 pulsation 동작이 발생한다. 본 논문에서는 금지

[†] E-mail: bgkim@e.ssu.ac.kr

대역폭이 서로 중첩되어 있는 경우 결합 세기 κL , DFB 영역과 위상 조정 영역의 길이 등 구조 파라미터가 pulsation 동작 특성에 미치는 효과에 대하여 살펴보았다. 금지 대역폭 내에 존재하는 전체 공진기 모드의 수를 구하여 pulsation 동작 특성을 예측하였다. 금지 대역폭 내에 존재하는 전체 공진기 모드의 수가 적을수록 $\Delta\lambda_B$ 의 변화에도 불구하고 모드 호핑이 발생하지 않아 pulsation 주파수가 연속적으로 변화하였다. Pulsation 주파수가 연속적으로 변화하는 $\Delta\lambda_B$ 의 영역이 큰 경우 두 DFB 영역의 회절 격자 제작시에 격자 주기에 대한 제작 공차가 크다는 장점을 가진다. 또한 이 경우 위상 조정 영역의 위상이 변화하여도 모드 호핑이 발생하지 않아 안정된 pulsation 동작을 얻을 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 다중 전극 DFB 레이저의 동적 특성해석을 위한 시간 영역 모델에 대하여 간략히 살펴보았고 3장에서는 다중 전극 DFB 레이저에서 모드 비팅으로 인하여 발생하는 pulsation의 동작 원리에 대하여 살펴보았다. 4장에서는 결합 세기 κL , DFB 영역과 위상 조정 영역의 길이 등 여러 가지 구조 파라미터가 pulsation 동작 특성에 미치는 효과에 대하여 살펴보았다. 마지막으로 5장에서는 본 논문의 결론을 맺었다.

II. 시간 영역 모델

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 결합 모드 방정식과, 광자와 상호 작용을 하는 캐리어의 밀도 변화를 나타내는 비율 방정식을 시간 영역에서 해석한 것으로 그 수식은 다음과 같다.^[12]

$$\frac{1}{v_g} \frac{\partial a^{\pm}(z, t)}{\partial t} \pm \frac{\partial a^{\pm}(z, t)}{\partial z} = \left(\frac{g}{2} - \frac{\alpha}{2} - j\delta \right) a^{\pm}(z, t) - j\kappa a^{\mp}(z, t) + F^{\pm}(z, t) \quad (1)$$

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

여기서 $a^+(z, t)$ 와 $a^-(z, t)$ 는 각각 순방향과 역방향으로 진행되는 정규화된 slowly-varying 필드의 크기, κ 는 결합 계수(DFB 영역), v_g 는 군속도, g 는 물질 이득 계수, α 는 손실 계수, δ 는 레이저의 발진 파장이 브래그 파장으로부터 얼마나 벗어나 있는지는 나타내는 인자이다. 물질 이득 계수 g 는 파장에 따라 변화한다. 이러한 이득 스펙트럼을 고려하기 위하여 디지털 필터 기법을 사용하였다.^[13] $F^+(z, t)$ 와 $F^-(z, t)$ 는 자발 방출 잡음으로 레이저 발진시에 구동원으로 동작한다. 비율 방정식에서 $N(z, t)$ 은 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 밀도를 나타내며 $S(z, t) = (|a^+(z, t)|^2 + |a^-(z, t)|^2) / (v_g h\nu)$ 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^[12] 사용하였다. 시간 영역에서 구한 결과로부터 출력 파워, 광 스펙트럼 및 RF 스펙트럼과 변조 지수 등을 구하였다.

본 논문에서 사용한 DFB 영역의 주입 전류는 주어진 결합 세기에서의 문턱 전류보다 30 mA 큰 전류이다. 위상 조정 영역에 전류가 주입되면 굴절율이 변화하고, 따라서 진행되는 필드의 위상이 변화한다. 위상 조정 영역 왕복시 굴절율 변화에 의해서 발생하는 위상 변화량은 다음 수식과 같이 표현된다.

$$\Delta\phi_p = \frac{2\pi\Delta n_e}{\lambda} 2L_p \quad (3)$$

여기서 Δn_e 는 주입 전류에 의한 유효 굴절율 변화량, λ 는 발진 파장, L_p 는 위상 조정 영역의 길이이다. 예를 들어 L_p 가 300 mm이고 발진 파장 λ 가 1.55 μm 이면 위상 조정 영역의 위상이 2π 변화하기 위해서는 유효 굴절율이 약 0.00258 변화하여야 한다. 위상 조정 영역에 주입된 전류에 의한 굴절율 변화는 참고 문헌^[8]의 근사화된 수식 (11)과 (12)를 사용하여 구할 수 있으며, 이 경우 위상 조정 영역의 위상이 2π 변화하기 위해서 주입하여야 하는 전류는 약 4.5 mA이다. 본 논문에서는 위상 조정 영역에 주입되는 전류에 의해 위상이 변화한다는 가정하에 위상을 0에서 2π 까지 변화시키면서 pulsation 동작 특성을 살펴보았다. 이러한 위상 변화는 식 (1)에서 벗어남 인자인 δ 에 반영되고 위상 조정 영역

에서 δ 는 $\delta = \Delta\phi_p / L_p$ 와 같이 표현된다. 이 수식은 위상 조정 영역에 전류가 주입되지 않은 경우, 즉 초기 위상을 0으

표 1. 계산에 사용된 파라미터

| 파라미터 | 값 | 단위 | 의미 |
|------------|------------------|---------------------------------------|----------------------|
| d | 0.2 | 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 | 0.75 | $10^{-40} \text{ m}^6 \text{ s}^{-1}$ | 오제(Auger) 캐리어 재결합 계수 |
| α_H | 4 | | 선폭 증가 계수 |
| N_0 | 1.5 | 10^{24} m^{-3} | 투명 캐리어 밀도 |
| Γ | 0.3 | | 도파로 구속 계수 |
| α_0 | 20×10^2 | m^{-1} | 손실 |
| g_N | 2.5 | 10^{-20} m^{-2} | 미분 이득 |
| ϵ | 4 | 10^{-23} m^3 | 비선형 이득 억제 계수 |

로 가정한 경우이다. 본 논문에서는 위상 조정 영역에 주입된 전류에 의해 유기되는 손실은 무시하였다. 계산에 사용한 나머지 파라미터는 표 1과 같다.

III. Pulsation 동작 원리

그림 1은 두 개의 DFB 영역과 위상 조정 영역으로 구성된 다중 전극 DFB 레이저의 개념도를 나타내는 그림이다. 각각의 DFB 영역에 분턱 전류 이상의 전류가 주입되면 각각의 DFB 영역에서 발진 모드가 존재한다. 이러한 두 모드의 비팅으로 인하여 pulsation 동작이 발생한다. 따라서 pulsation 동작 특성은 각각의 DFB 영역에서 발진하는 모드의 특성 및 위상 조정 영역의 위상에 의해 결정된다.

그림 2는 분턱 전류 이상에서 두 DFB 영역의 반사 스펙트럼을 나타내는 그림이다. 여기서 DFB 영역 2의 격자 주기를 DFB 영역 1의 격자 주기보다 크도록 설정하면 DFB 영역 2의 브래그 파장이 DFB 영역 1의 브래그 파장 보다 커서 각각의 DFB 영역의 반사 스펙트럼은 그림 2와 같이 나타나게 된다. 여기서 Δ 는 DFB 영역의 금지 대역폭이고 $\Delta\lambda_B$ 는 두 DFB 영역의 브래그 파장 차이로 $\Delta\lambda_B = \lambda_{B2} - \lambda_{B1}$ 이다. +1과 -1은 각각 DFB 영역 1의 장파장 모드와 단파장 모드를 의미하고, +2와 -2는 각각 DFB 영역 2의 장파장 모드와 단파장 모드를 의미한다. 각각의 DFB 영역은 두 가지 기능을 가지고 있다. 즉 각각의 DFB 영역은 분턱 전류 이상에서 레이저로서 동작하고 또한 다른 DFB 영역에 대하여 반사기로 동작한다. 따라서 각각의 DFB 영역에서 발진하는 모드는 전체 공진기에 대한 경계 조건을 만족하여야 한다.

그림 2(a)는 두 DFB 영역의 반사 스펙트럼의 금지 대역폭이 서로 중첩되어 있는 경우로 ($\Delta\lambda_B < \Delta$) DFB 영역 1의 +1 모드는 DFB 영역 2의 금지 대역 내에 위치하고 있는 반면 -1 모드는 DFB 영역 2의 금지 대역 밖에 위치하고 있다. 따라서 DFB 영역 1에서는 +1 모드가 -1 모드에 비해 DFB 영역 2로부터 반사되는 필드가 크다. 이로 인하여 DFB 영역 1에서는 분턱 이득이 작은 +1 모드가 발진하게 된다. 반면에 DFB 영역 2에서는 -2 모드가 DFB 영역 1의 금지 대역 내에 위치하여 DFB 영역 1로부터 반사되는 필드의 크기가 크다. 따라서 DFB 영역 2에서는 -2 모드가 발진하게 된다. 이러한 두 모드의 비팅으로 인하여 pulsation 동작이 발생한다.

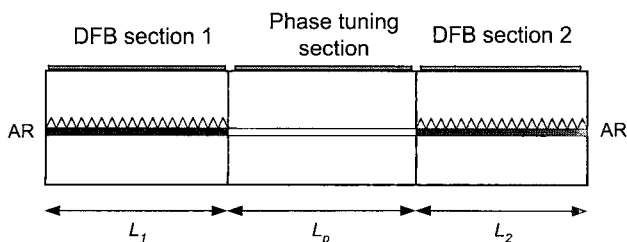
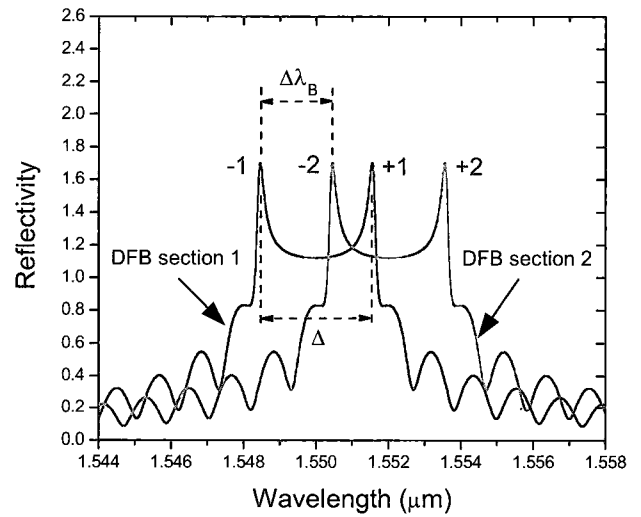
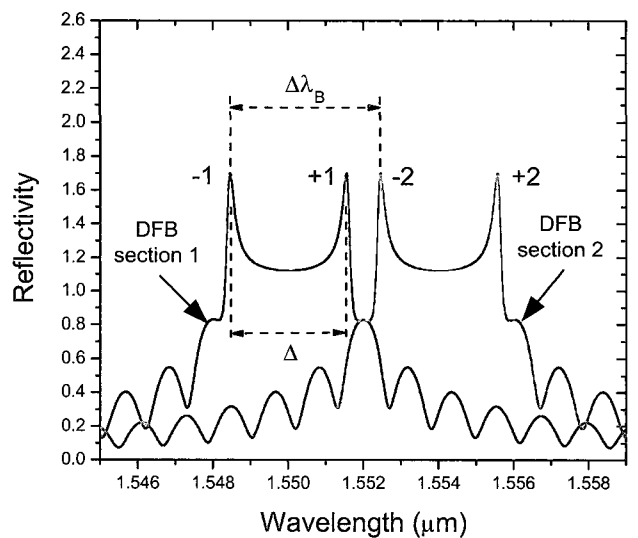


그림 1. 두 개의 DFB 영역과 위상 조정 영역으로 구성된 다중 전극 DFB 레이저의 개념도.

그림 2(b)는 두 DFB 영역의 반사 스펙트럼의 금지 대역폭이 서로 중첩되지 않는 경우로 ($\Delta\lambda_B > \Delta$) 각각의 DFB 영역에서 발진하는 모드는 다른 DFB 영역의 금지 대역 밖에 존재한다. 이 경우 각 DFB 영역에서 발진하는 모드는 위상 조정 영역의 위상, SHB 현상, 양 단면의 격자 위상, $\Delta\lambda_B$ 의 크기, 이득 스펙트럼, 잡음 등에 의해 단파장 모드 또는 장파장 모드가 발진하며 따라서 모드 호핑(mode hopping) 현상이 쉽게 발생한다.^[11] 여기서 모드 호핑이란 주입 전류, SHB 현상, 온도, 잡음 등으로 인하여 발진하는 모드가 급격하게 다른 모드로 바뀌는 현상을 의미한다. 모드 호핑이 발생하는 경우 pulsation 주파수는 급격하게 변화하여 불안정한 pulsation 동



(a)



(b)

그림 2. (a) 두 DFB 영역의 반사 스펙트럼의 금지 대역폭이 서로 중첩되어 있는 경우($\Delta\lambda_B < \Delta$)와 (b) 두 DFB 영역의 반사 스펙트럼의 금지 대역폭이 서로 중첩되지 않는 경우($\Delta\lambda_B > \Delta$) 각각의 index-coupled DFB 영역의 반사 스펙트럼.

작 특성을 나타낸다. 즉 두 DFB 영역의 반사 스펙트럼의 금지 대역이 서로 중첩되어 있는 경우(그림 2(a))에 비하여 불안정한 pulsation 동작이 발생하리라 예상할 수 있다.

각각의 DFB 영역에서 발진하는 모드의 비팅에 의해서 안정된 pulsation 동작이 발생하기 위해서는 다음과 같은 조건을 만족하여야 하고 다음 조건을 모두 만족하는 경우에 대하여 pulsation 동작이 발생하였다고 결정하였다.

1. 출력 파형의 pulsation 주파수는 두 DFB 영역에서 발진하는 모드의 파장 차이로 주어지는 주파수와 일치하여야 한다.
2. RF 스펙트럼에서 pulsation 동작의 기본 주파수와 기본 주파수 이외의 주파수 성분, 즉 스퓨리어스(spurious) 성분과의 크기 차이가 25 dB 이상이어야 한다.
3. 출력 파형의 변조 지수가 0.1 이상이어야 한다.

그림 3은 두 DFB 영역의 브래그 파장 차이 $\Delta\lambda_B$ 에 따른 (λ_{BL} 를 증가시키면서) pulsation 주파수와 발진 파장의 변화를 나타내는 그림이다. 여기서 두 DFB 영역과 위상 조정 영역의 길이는 모두 $300\ \mu\text{m}$ 이고 두 DFB 영역의 결합 세기는 2이다. 위상 조정 영역에 주입되는 전류는 0으로 위상 변화는 0으로 설정하였다. 이 경우 금지 대역폭 Δ 는 $2.25\ \text{nm}$ 이다. 그림 3(a)에서 점선은 (---) 각각의 DFB 영역이 독립적으로 존재하였을 경우 DFB 영역 1의 +1 모드와 DFB 영역 2의 -2 모드 간의 비팅에 의해 발생하는 pulsation 주파수를 나타낸다. 그림 3(b)에서 점선은 두 DFB 영역이 독립적으로 존재하였을 경우 +1 모드와 -1 모드, +2 모드와 -2 모드의 파장을 나타내고 실선은 (—) 전체 공진기의 경계 조건을 만족하는 전체 공진기 모드의 자취를 나타내는 그림이다. 전체 공진기 모드는 두 DFB 영역에 전류가 주입되어 이득이 존재하는 경우 정적 모델^[14]을 사용하여 구하였고 SHB 현상은 고려하지 않았다. 두 DFB 영역의 반사 스펙트럼의 금지 대역이 서로 중첩되어 있는 경우 $-\Delta\lambda_B$ 가 금지 대역폭인 $2.25\ \text{nm}$ 보다 작은 경우 - 그림 3(b)에서 볼 수 있듯이 대부분의 $\Delta\lambda_B$ 영역에서 +1 모드와 -2 모드가 발진함을 알 수 있다. 그러나 각각의 DFB 영역에서 발진하는 모드는 다른 DFB 영역으로부터 반사되는 필드에 의해 영향을 받는다. 즉 각각의 DFB 영역에서 발진하는 모드는 전체 공진기에 대한 경계 조건을 만족하여야 한다. 따라서 각각의 DFB 영역에서 발진하는 모드는(그림 3(b)에서 ●) 점선 근처의 전체 공진기 모드에 존재함을 알 수 있다. 각각의 DFB 영역에서 발진하는 모드의(그림 3(b)에서 ●) 일부는 전체 공진기 모드의 자취와 약간의 오차를 보였는데 이는 SHB 현상을 고려하지 않고 전체 공진기 모드를 구하였기 때문이라 생각된다. DFB 영역 2가 독립적으로 존재하였을 경우 즉 -2 모드의 자취인 점선의 기울기는 전체 공진기 모드의 기울기에 비하여 크다. 그 이유는 DFB 영역 2의 브래그 파장이 증가함에 따라 발진 모드인 -2 모드의 파장이 거의 같은 비율로 증가하여 $\Delta\lambda_B$ 에 따른 기울기는 거의 1인데 반하여, 전체 공진기 모드는 위상

조정 영역과 DFB 영역 1을 포함한 전체 공진기에 대한 경계 조건을 만족하여야 하므로 DFB 영역 2의 브래그 파장이 증가하여도 전체 공진기 모드의 파장이 같은 비율로 증가하지 않고 1 보다 작은 기울기를 가지고 증가하기 때문이다. 따라서 그림 3(b)에서와 같이 $\Delta\lambda_B$ 가 증가함에 따라 DFB 영역 2에서 발진하는 모드는 점선 근처에 존재하는 인접된 전체 공진기 모드로 호핑이 발생하였다. 이로 인하여 pulsation 주파수는 그림 3(a)와 같이 불연속적으로 나타남을 알 수 있다. 불연속적으로 변화하는 pulsation 주파수 차이는 근사적으로 전체 공진기 모드의 파장 간격에 해당된다.

반면에 두 DFB 영역의 반사 스펙트럼의 금지 대역폭이 서로 중첩되지 않는 경우 -그림 3에서 $\Delta\lambda_B$ 가 금지 대역폭인

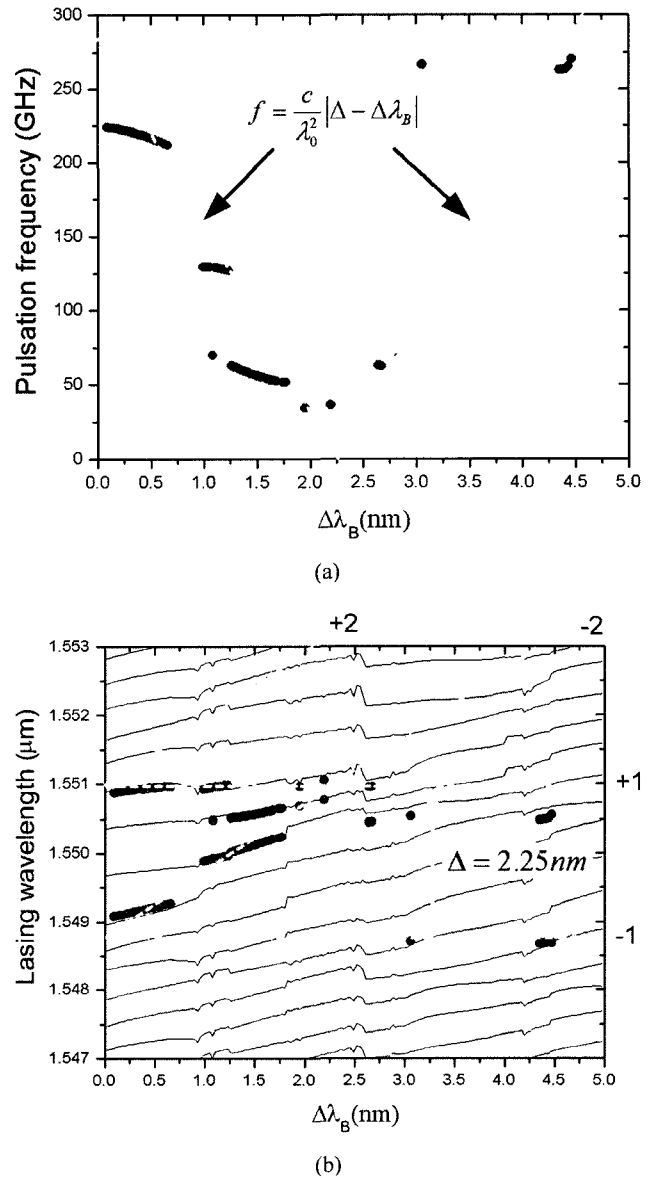


그림 3. 두 DFB 영역의 브래그 파장 차이 $\Delta\lambda_B$ 에 따른 (a) pulsation 주파수와 (b) 발진 파장의 변화. $\kappa L_1 = \kappa L_2 = 2$, $L_1 = L_2 = L_p = 300\ \mu\text{m}$.

2.25 nm 보다 큰 경우 각각의 DFB 영역에서는 장파장 모드와 단파장 모드의 문턱 이득이 거의 비슷해진다. 이 경우 발진 모드는 SHB 현상, 위상 조정 영역의 위상, 이득 스펙트럼, 또는 잡음 등에 의해 선택된다. 따라서 장파장 모드와 단파장 모드 사이에 모드 호핑이 쉽게 발생하게 된다.^[11] 즉 각각의 DFB 영역에서 발진하는 모드가 매우 불안정하리라 예상할 수 있다. 따라서 그림 3에서 볼 수 있듯이 대부분의 $\Delta\lambda_B$ 영역에서 안정된 pulsation 동작이 발생하지 않음을 알 수 있다. 본 논문에서는 두 DFB 영역의 반사 스펙트럼의 금지 대역이 서로 중첩되어 있는 경우(그림 2(a))에 대하여 pulsation 동작 특성에 대하여 살펴보았다.

IV. Pulsation 동작 특성

DFB 레이저에서 SHB 현상은 pulsation 동작과 같은 동적 특성에 큰 영향을 미친다. 이러한 SHB 현상은 결합 세기 xL 이 증가할수록 심하게 나타난다. 먼저 동일한 결합 세기에 대하여 다중 전극 DFB 레이저에서 발생하는 pulsation 동작 특성을 살펴보았다. 그림 2와 3에서 살펴보았듯이 pulsation 동작 특성은 금지 대역폭 Δ 와 두 DFB 영역의 브래그 파장 차이 $\Delta\lambda_B$ 에 따라 달라지므로 $\Delta\lambda_B$ 와 pulsation 주파수를 금지 대역폭에 대하여 정규화하였다. 정규화된 디튜닝은(정규화된 브래그 파장 차이) $\Delta\lambda_B/\Delta$ 이고 정규화된 pulsation 주파수는 f/f_Δ 이다. 여기서 f_Δ 는 DFB 영역의 금지 대역폭인 Δ 에 해당하는 주파수로 $\Delta c/\lambda_0^2$ 이다. 그림 4는 각 DFB 영역의 결합 세기가 2인 경우 여러 가지 DFB 영역의 길이에 대하여 정규화된 디튜닝의 함수로 도시한 정규화된 pulsation 주파수와 발진 파장을 나타내는 그림이다. 여기서 위상 조정 영역의 길이는 $300 \mu\text{m}$ 이며 위상은 0으로 설정하였다. 정규화된 디튜닝이 0에서 1사이의 값을 가지는 경우는 두 DFB 영역의 반사 스펙트럼의 금지 대역폭이 서로 중첩되어 있는 그림 2(a)에 해당된다. 그림 4(b), 4(d)와 4(f)에서 각각의 DFB 영역에서 발진하는 모드는 그림 3(b)에서와 같이 전체 공진기의 경계 조건을 만족하는 전체 공진기 모드 부근에 존재함을 알 수 있다. 또한 정규화된 디튜닝이 증가함에 따라 인접된 다른 공진기 모드로 호핑이 발생하여 정규화된 주파수가 불연속적으로 변화함을 볼 수 있다.

동일한 결합 세기에 대하여 DFB 영역의 길이가 증가할수록 금지 대역폭 Δ 와 전체 공진기 모드의 모드간의 파장 차이 $\delta\lambda$ 가 감소하였다. 여기서 $\delta\lambda$ 와 Δ 는 두 DFB 영역의 길이와 결합 계수가 같은 경우($L=L_1=L_2$, $x=x_1=x_2$) 근사적으로 다음 수식을 사용하여 구할 수 있다.^[15,16]

$$\delta\lambda \approx \frac{\lambda_0^2}{2n_g(2L_e + L_p)} \quad (4)$$

$$\Delta \approx \frac{\lambda_0^2}{n_e \pi} \frac{xL\sqrt{2}}{\tanh(xL)} \frac{1}{L} \quad (5)$$

여기서 λ_0 는 $1.55 \mu\text{m}$, n_g 는 군 굴절율, n_e 는 유효 굴절율

이고 L_e 는 DFB 영역의 유효 길이이다. 결합 세기가 고정되어 있을 경우 DFB 영역의 유효 길이는 필드의 파장과 이득에 따라 변화한다. 필드의 파장이 브래그 파장과 동일한 경우 유효 길이는 최소값을 나타내고, 이 경우 이득 변화에 따른 유효 길이 변화는 매우 작으며, 금지 대역 폭 내에서 필드의 파장이 브래그 파장과 차이가 커질수록 유효 길이는 증가한다.^[17] 이득이 0이고 파장이 브래그 파장과 동일한 경우 DFB 영역의 유효 길이는 최소값이며 $L \tanh(xL)/(2xL)$ 과 같이 표현된다. 정적 모델로 구한 전체 공진기 모드 자취를 나타내는 그림 4(b), 그림 4(d)와 그림 4(f)에서 $\Delta\lambda_B$ 가 0이고 파장이 브래그 파장인 $1.55 \mu\text{m}$ 근처에서 전체 공진기 모드의 모드간의 파장 차이가 최대값을 나타내고 브래그 파장과 멀어질수록 감소함을 알 수 있다. 그림 4(b), 그림 4(d)와 그림 4(f)에 주어진 $\delta\lambda$ 의 값은 파장이 브래그 파장인 경우 식 (4)를 사용하여 구한 값으로 전체 공진기 모드 자취를 나타내는 그림에서 브래그 파장 근처에서의 모드간의 파장 차이와 거의 일치함을 알 수 있다. 안정된 pulsation 동작 특성이 나타나는 영역이 두 DFB 영역의 금지 대역이 서로 중첩되어 있는 경우이므로 이 경우 식 (4)와 (5)를 사용하여 금지 대역폭 내에 존재하는 전체 공진기 모드의 수를 근사적으로 구할 수 있다.

식 (4)에서 $\delta\lambda$ 는 위상 조정 영역의 길이를 포함한 전체 공진기의 유효 길이에 의해서 결정된다. 고정된 결합 세기에 대하여 DFB 영역의 길이가 증가할수록 DFB 영역의 유효 길이가 증가하여 $\delta\lambda$ 는 감소하게 된다. 또한 Δ 도 식 (5)에서 보는 것처럼 고정된 결합 세기에 대하여 DFB 영역의 길이가 증가할수록 감소한다. 결합 세기가 고정된 경우 $\delta\lambda$ 는 전체 공진기 길이에 의해 결정되는 반면에 Δ 는 DFB 영역의 길이에 의해서만 결정되므로 DFB 영역의 길이가 증가함에 따라 발생하는 $\delta\lambda$ 의 감소량에 비해 Δ 의 감소량이 크다. 그림 4(b)의 경우 식 (4)와 (5)를 사용하여 구한 Δ 와 $\delta\lambda$ 는 각각 3.38 nm 이고 0.82 nm 이다. 이 경우 금지 대역 내에 4 개의 전체 공진기 모드가 존재한다. 반면에 그림 4(f)의 경우 Δ 는 약 1.35 nm 이고 $\delta\lambda$ 는 약 0.6 nm 로 금지 대역 내에 2 개의 전체 공진기 모드가 존재한다. 따라서 그림 4(a)인 경우가 그림 4(e)인 경우에 비하여 정규화된 디튜닝의 변화에 따른 발진 모드의 호핑이 많이 발생함을 알 수 있다.

그림 4(a)와 4(b)에서 정규화된 디튜닝이 약 0.05에서 0.1까지의 영역에서는(두 DFB 영역의 브래그 파장 차이가 작은 경우) DFB 영역 1에서 +1 모드 대신에 -1 모드가 발진하였고, -1 모드와 DFB 영역 2의 -2 모드 사이에 모드 비팅이 발생하여 낮은 정규화된 주파수를 가지는 pulsation 동작이 발생함을 알 수 있다. 정규화된 디튜닝이 약 0.3과 0.6 부근에서는 발진 모드(-2 모드) 호핑이 발생하였고, 호핑이 발생하는 디튜닝 영역 근처에서는 pulsation 동작이 발생하지 않았다. 그림 4(c)와 4(d)에서는 정규화된 디튜닝이 0.3 부근과 0.7 이상 영역에서는 pulsation 동작이 거의 발생하지 않았다. 그림 4(e)와 4(f)에서는 정규화된 디튜닝이 0.5 이하에서는 두 개의 모드(+1 모드와 -2 모드) 이외에 발진하는 다른 모

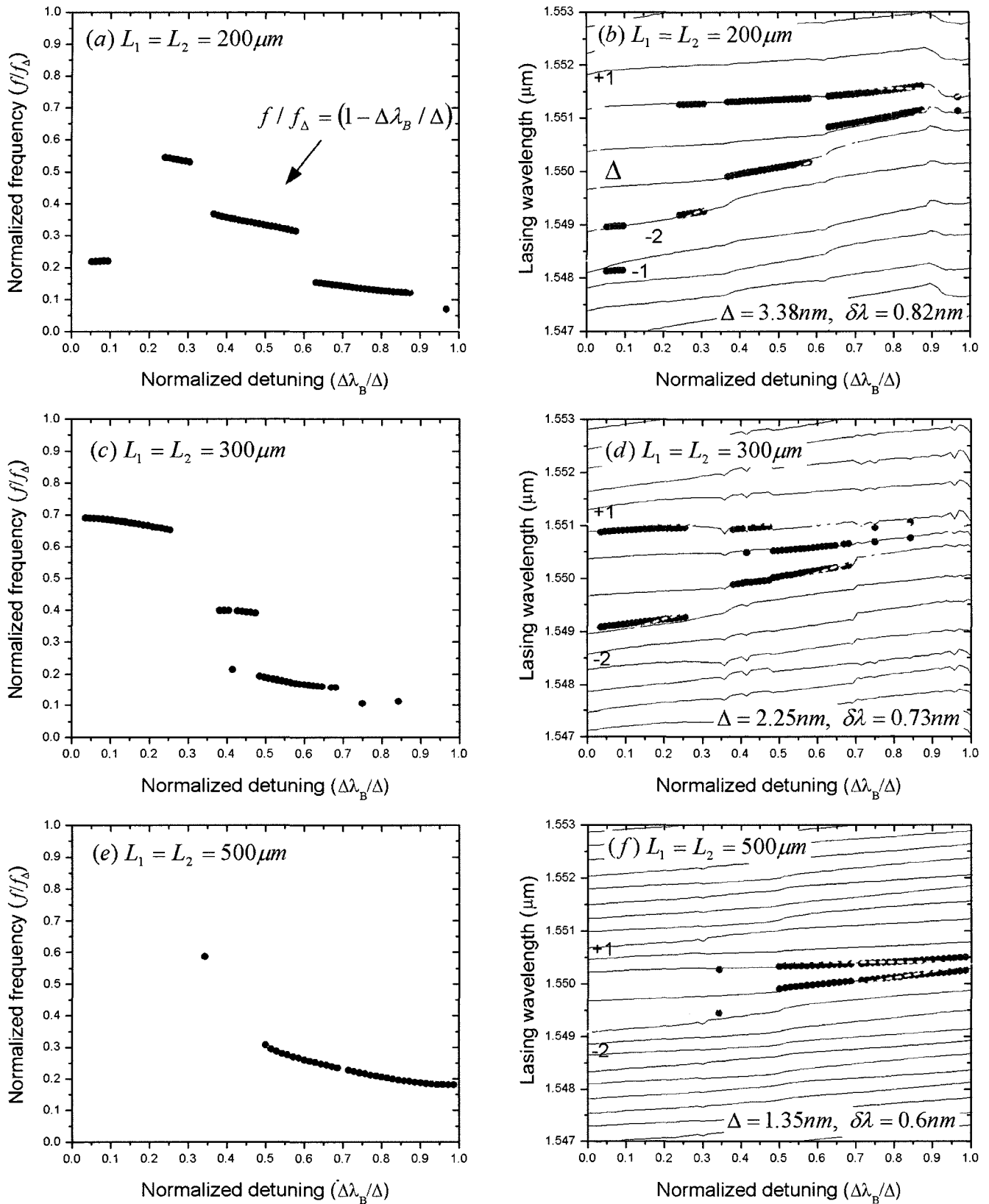


그림 4. 결합 세기가 2인 경우 여러 가지 DFB 영역의 길이에 대하여 정규화된 디튜닝의 함수로 도식한 정규화된 pulsation 주파수와 발진 파장. $xL_1 = xL_2 = 2, L_p = 300\mu\text{m}$.

드의 크기가 증가하였다. 그 결과 출력 파워에 대한 RF 스펙트럼에서 스퓨리어스 성분의 크기가 증가하여 pulsation 동작 조건을 만족하지 못하였다. 그러나 pulsation 동작이 발생하는 $\Delta\lambda_B$ 의 영역에서는 $\Delta\lambda_B$ 가 변화하여도 모드 호핑이 발생하지 않아 pulsation 주파수가 연속적으로 변화하였다. 그림 4에서 살펴보았듯이 동일한 결합 세기를 가지는 경우 DFB 영역의 길이가 달라짐에 따라 pulsation 동작 특성이 다르게 나타남을 알 수 있다. DFB 영역의 금지 대역폭 내에 존재하는 전체 공진기 모드의 수에 따라 pulsation 동작 특성이 달라짐을 알 수 있다.

그림 5는 결합 세기가 2인 경우 여러 가지 DFB 영역의 길이에 대하여 위상 조정 영역의 위상 변화에 따른 pulsation 주파수와 발진 파장의 변화를 나타내는 그림이다. 여기서 정규화된 디튜닝 $\Delta\lambda_B/\Delta$ 은 0.6으로 고정하였고 L_p 는 $300\ \mu\text{m}$ 이다. DFB 영역의 길이가 감소할수록 금지 대역폭 내에 존

재하는 전체 공진기 모드의 수가 증가하므로 위상 조정 영역의 위상 변화에 대하여 모드 호핑이 쉽게 발생하리라 생각된다. DFB 영역의 길이가 $200\ \mu\text{m}$ 인 그림 5(b)인 경우 정규화된 위상 변화($\Delta\phi_p/2\pi$)가 0.35인 근처에서 +1 모드의 호핑이 발생하여 그림 5(a)에서 보는 것처럼 pulsation 주파수가 150 GHz 대역과 75 GHz 대역의 두 영역에서 나타남을 알 수 있다. 반면에 DFB 영역의 길이가 $300\ \mu\text{m}$ 와 $500\ \mu\text{m}$ 인 경우 모드 호핑이 발생하지 않았다. 따라서 그림 5(a)에서 보는 것처럼 두 경우에는 pulsation 주파수가 연속적으로 변화함을 알 수 있다. 정규화된 디튜닝 값이 고정된 경우 DFB 영역의 길이가 증가할수록 금지 대역폭 Δ 가 감소하여 pulsation 주파수가 감소함을 볼 수 있다. DFB 영역의 길이가 $300\ \mu\text{m}$ 와 $500\ \mu\text{m}$ 인 경우 각각 50 GHz와 40 GHz 대역에서 pulsation 동작이 발생함을 알 수 있다. 그림 5(b), 그림 5(c)와 그림 5(d)에서 pulsation 동작이 발생하지 않는 영역은 pulsation

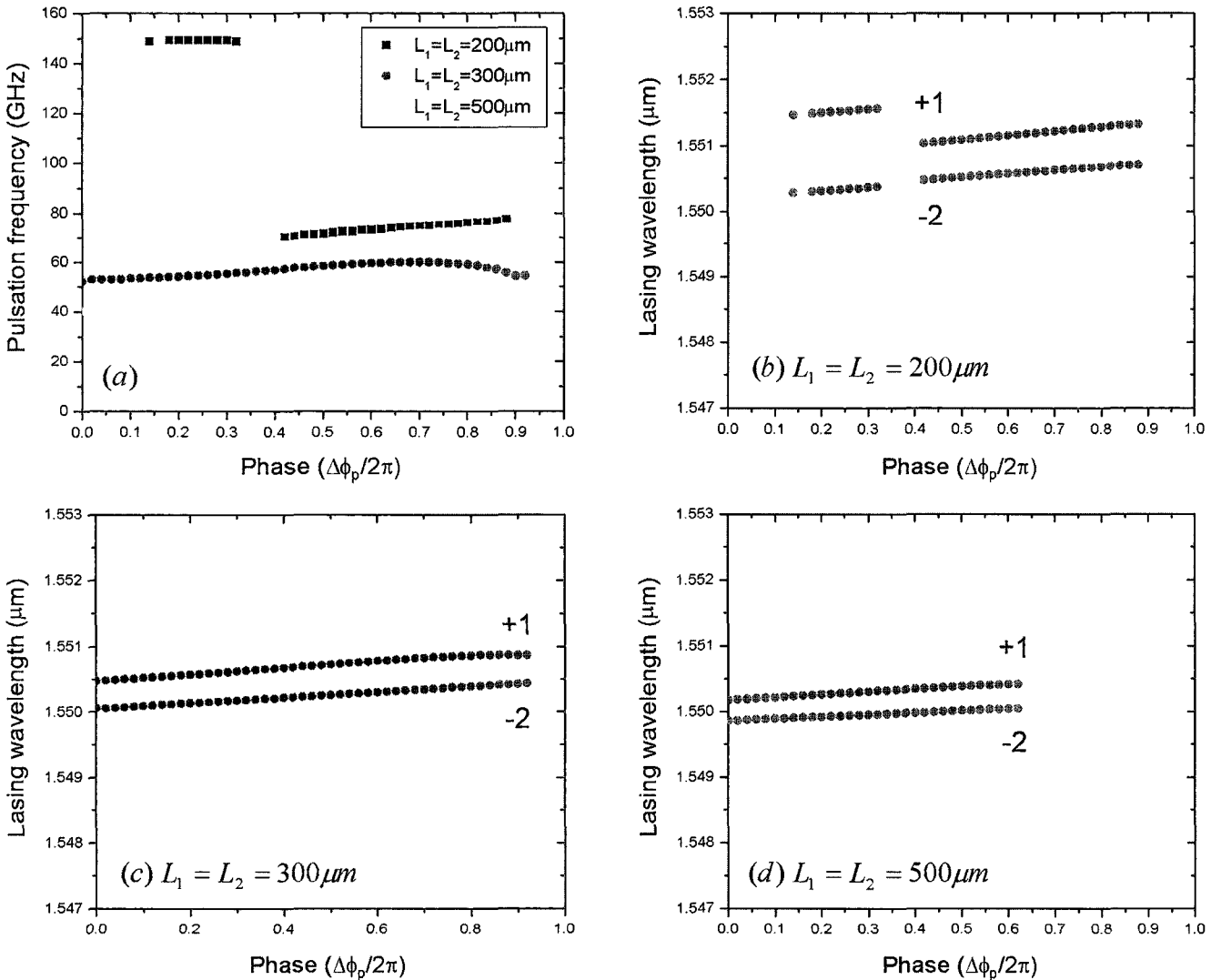


그림 5. 결합 세기가 2인 경우 여러 가지 DFB 영역의 길이에 대하여 위상 조정 영역의 위상 변화에 따른 (a) pulsation 주파수와 (b), (c), (d) 발진 파장의 변화. $L_p = 300\ \mu\text{m}$, $\Delta\lambda_B/\Delta = 0.6$.

동작 조건을 만족하지 못한 경우이다.

다중 전극 DFB 레이저에서 위상 조정 영역의 위상 변화에 따라 모드 호핑이 발생하지 않는 안정된 pulsation 동작을 얻기 위해서는 금지 대역폭 내에 존재하는 전체 공진기 모드의 수가 작아야 한다. 이것은 DFB 영역의 결합 세기 및 각 영역의 길이에 따라 달라진다. 두 DFB 영역의 길이가 같은 경우 λ_0 가 $1.55 \mu\text{m}$, n_e 와 n_g 가 각각 3.32와 3.7이고 L_e 를 $L \tanh(xL)/(2xL)$ 으로 근사화하면, 식 (4)와 (5)를 사용하여 금지 대역폭 내에 존재하는 전체 공진기 모드의 수를 나타내는 $\Delta/\delta\lambda$ 을 다음 수식과 같이 근사적으로 구할 수 있다.

$$\frac{\Delta}{\delta\lambda} \approx 1 + \frac{xL_p}{\tanh(xL)} \quad (6)$$

금지 대역폭 내에 존재하는 전체 공진기 모드의 수를 나타내는 $\Delta/\delta\lambda$ 의 값으로부터 $\Delta\lambda_B/\Delta$ 가 0에서 1까지 변화하는 동안 발진 모드가 호핑되는 경우의 수를 예측할 수 있다. $\Delta/\delta\lambda$ 에 가장 가까운 정수를 N이라 하면 금지 대역 내 존재하는 전체 공진기 모드의 수는 N+1, 모드 호핑이 발생할 수 있는 최대 경우의 수는 N-1로 근사적으로 구할 수 있다. 그러나 위상 조정 영역의 위상 변화에 따라 금지 대역폭의 위치는 고정되어 있는 반면 전체 공진기 모드의 자취는 이동한다. 따라서 금지 대역폭 내에 존재하는 전체 공진기 모드의 수(N+1)는 위상 조정 영역의 위상에 따라 ± 1 만큼 달라질 수 있다. 그림 4(b), 4(d)와 4(f)인 경우 $\Delta/\delta\lambda$ 은 각각 4.1, 3.1과 2.2이고, 금지 대역폭 내에 존재하는 전체 공진기 모드 수는 각각 4, 4와 3이다. 식 (4)에서 xL 이 3 보다 큰 경우 $\Delta/\delta\lambda$ 는 $1 + xL_p$ 로 더욱 간단한 수식으로 근사되어지며 주로 결합 계수와 위상 조정 영역의 길이에 의해서 결정된다. 결합 세기와 위상 조정 영역의 길이가 고정되어 있는 경우 DFB 영역의 길이가 증가할수록 결합 계수가 작아져 $\Delta/\delta\lambda$ 는 감소하게 된다. 반면에 결합 세기와 DFB 영역의 길이가 고정되어 있는 경우 위상 조정 영역의 길이가 증가할수록 $\Delta/\delta\lambda$ 이 증가함을 알 수 있다.

그림 6은 여러 가지 위상 조정 영역의 길이에 대하여 정규화된 디튜닝의 함수로 도시한 정규화된 pulsation 주파수와 발진 파장을 나타내는 그림이다. 여기서 두 DFB 영역의 길이는 모두 $300 \mu\text{m}$ 이고 결합 세기는 2이다. DFB 영역의 금지 대역폭 Δ 는 위상 조정 영역의 길이에 관계없이 약 2.25 nm 이다. 위상 조정 영역의 길이가 감소할수록 $\delta\lambda$ 는 증가하였다. 위상 조정 영역의 길이가 $100 \mu\text{m}$ 인 그림 6(b)의 경우 식 (4)를 사용하여 구한 $\delta\lambda$ 는 약 1.3 nm 이며, 이는 그림 6(b)에서 $\Delta\lambda_B$ 가 0일 때 브래그 파장 근처에서 전체 공진기 모드의 모드간의 파장 차이와 거의 같음을 알 수 있다. 이 경우 $\Delta/\delta\lambda$ 은 1.7이다. 따라서 그림 6(b)와 같이 금지 대역 내에 3 개의 전체 공진기 모드가 존재하게 된다. 이 경우 정규화된 디튜닝 값이 약 0.15인 경우를 제외하면 대부분의 디튜닝 영역에서 발진 모드의 호핑이 발생하지 않았다. 따라서 pulsation 주파수는 대부분의 디튜닝 영역에서 연속적으로 변화하였다.

정규화된 디튜닝 값이 약 0.15 근처에서는 +1 모드 대신 -1 모드가 발진하여 불연속점이 나타났다. 반면에 위상 조정 영역의 길이가 $600 \mu\text{m}$ 인 그림 6(f)의 경우 $\delta\lambda$ 는 약 0.44 nm 으로 $\Delta/\delta\lambda$ 은 5.1이다. 이 경우 금지 대역 내에 6개의 전체 공진기 모드가 존재하게 된다. 따라서 정규화된 디튜닝 값을 변화시킬 때 발진 모드의 호핑이 자주 발생하게 된다. 이로 인하여 그림 6(e)에서도 볼 수 있듯이 pulsation 주파수가 불연속으로 변화하는 경우가 자주 발생하였다. 위상 조정 영역의 길이가 $300 \mu\text{m}$ 인 그림 6(c)와 6(d)의 경우 $\Delta/\delta\lambda$ 이 3.1이다. 이 경우 금지 대역폭 내에 4개의 전체 공진기 모드가 존재함을 알 수 있다. 정규화된 디튜닝이 약 0.3과 0.45 부근에서 모드 호핑이 발생하였고 이에 따라 pulsation 주파수도 급격하게 변화함을 알 수 있다.

그림 7은 그림 6에서 $\Delta\lambda_B/\Delta$ 가 0.6일 때 위상 조정 영역의 위상 변화에 따른 pulsation 주파수와 발진 파장의 변화를 나타내는 그림이다. 위상 조정 영역의 길이가 $100 \mu\text{m}$ 와 $300 \mu\text{m}$ 인 경우 거의 모든 위상 영역에서 pulsation 동작이 발생하였으며 또한 모드 호핑도 발생하지 않았다. 따라서 pulsation 주파수는 그림 7(a)의 경우 약 50 GHz에서 90 GHz 까지, 그림 7(c)의 경우 53 GHz에서 60 GHz 까지 연속적으로 변화함을 알 수 있다. L_p 가 $100 \mu\text{m}$ 인 경우 위상 조정 영역에서 위상이 2π 변화하기 위해서는 식 (3)을 사용하여 구하면 유효 굴절율이 약 0.00775 변화하여야 한다. 이는 $100 \mu\text{m}$ 인 위상 조정 영역에 주입되는 전류는 약 6.3 mA인 경우이다.^[8] 위상 조정 영역의 길이가 $600 \mu\text{m}$ 인 경우 위상 조정 영역의 위상 변화에 따라 +1 모드와 -2 모드에서 다른 전체 공진기 모드로 호핑이 발생하여 pulsation 주파수가 불연속적으로 변화함을 알 수 있다. 이로 인하여 pulsation 주파수가 80 GHz 영역과 120 GHz 영역에서 나타났다. 위상 조정 영역의 길이가 증가할수록 금지 대역폭 내에 존재하는 전체 공진기 모드의 수가 증가하여 위상 조정 영역의 위상이 변화할 때 다른 전체 공진기 모드로 호핑이 쉽게 발생함을 알 수 있다.

그림 8은 여러 가지 결합 세기에 대하여 정규화된 디튜닝의 함수로 도시한 정규화된 pulsation 주파수와 발진 파장을 나타내는 그림이다. 여기서 DFB 영역의 길이는 모두 $200 \mu\text{m}$ 이고 위상 조정 영역의 길이는 $300 \mu\text{m}$ 이다. 고정된 DFB 영역의 길이에 대하여 결합 세기가 커질수록 결합 계수가 커져 Δ 가 증가하였고 전체 공진기의 유효 길이가 감소하여 $\delta\lambda$ 가 증가하였다. 결합 계수가 커질수록 $\delta\lambda$ 의 증가량에 비해 Δ 의 증가량이 커 금지 대역폭 내에 존재하는 전체 공진기 모드 수가 증가하였고 또한 발진 모드의 호핑이 발생하는 수도 증가하였다. xL 이 0.9인 그림 8(a)와 8(b)인 경우 Δ 는 2.05 nm 이고 $\delta\lambda$ 는 0.71 nm 로 $\Delta/\delta\lambda$ 는 2.9이다. 금지 대역폭 내에 존재하는 전체 공진기 모드 수는 4이다. 반면에 xL 이 3인 그림 8(e)와 8(f)인 경우 Δ 는 4.91 nm 이고 $\delta\lambda$ 는 0.89 nm 로 $\Delta/\delta\lambda$ 는 5.5이다. 이 경우 금지 대역폭 내에 존재하는 전체 공진기 모드 수는 6이다. 따라서 xL 이 0.9인 경우에 비하여 xL 이 3인 경우가 모드 호핑이 발생하는 수

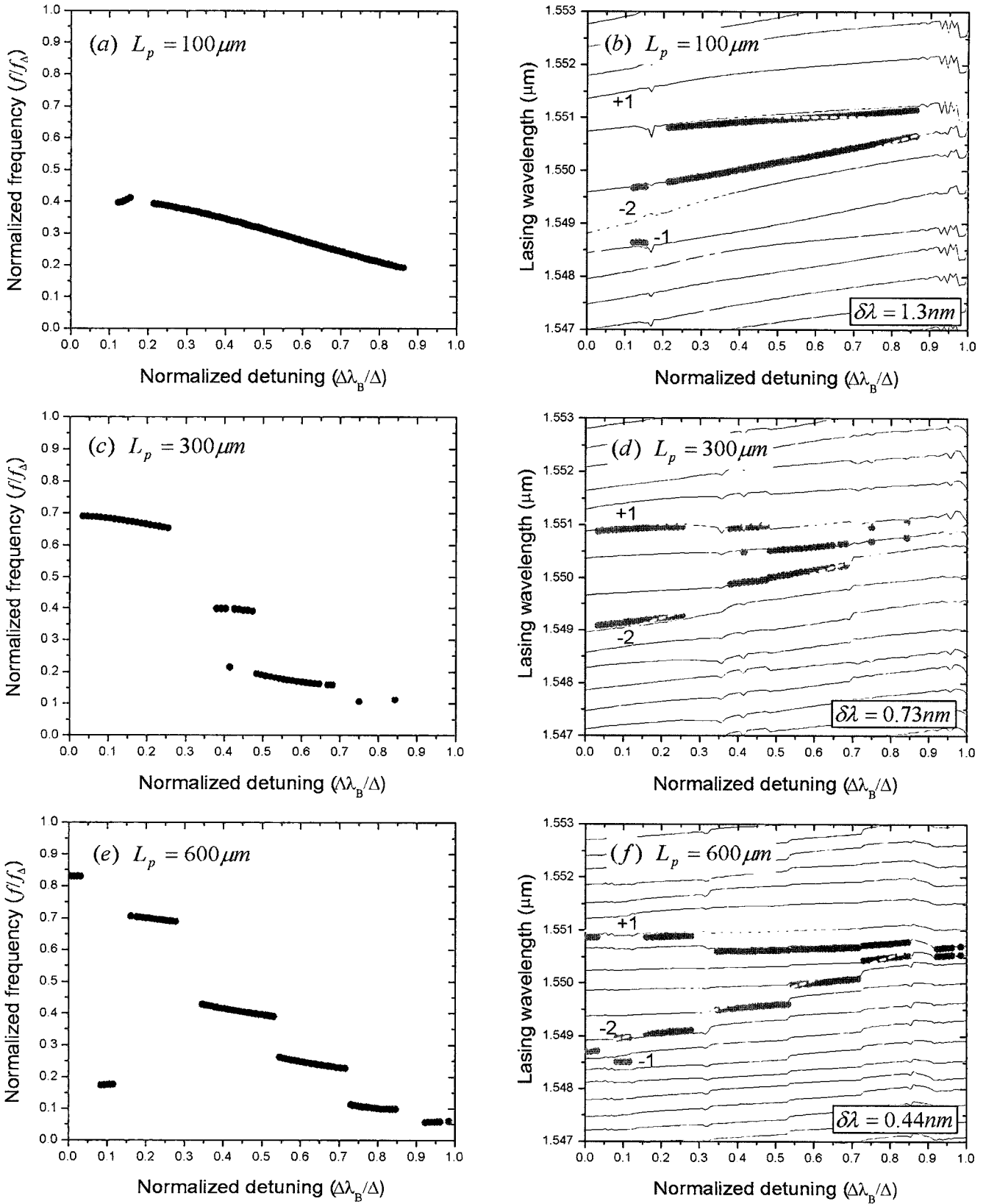


그림 6. 여러 가지 위상 조정 영역의 길이에 대하여 정규화된 디튜닝의 함수로 도시한 정규화된 pulsation 주파수와 발진 파장. $xL_1 = xL_2 = 2$, $L_1 = L_2 = 300 \mu\text{m}$.

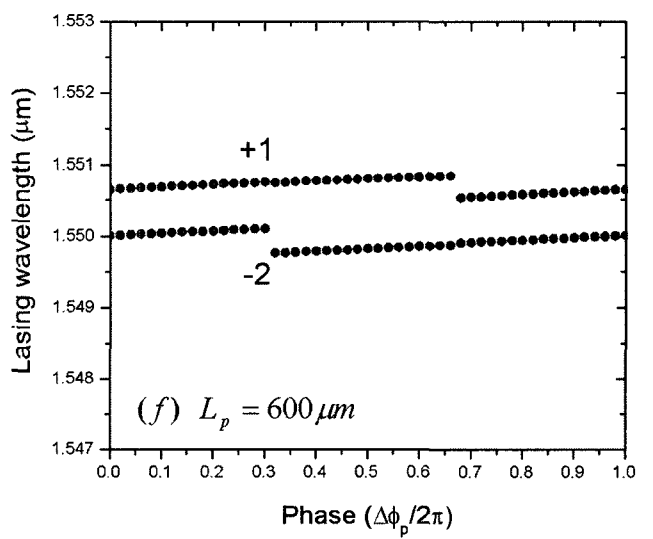
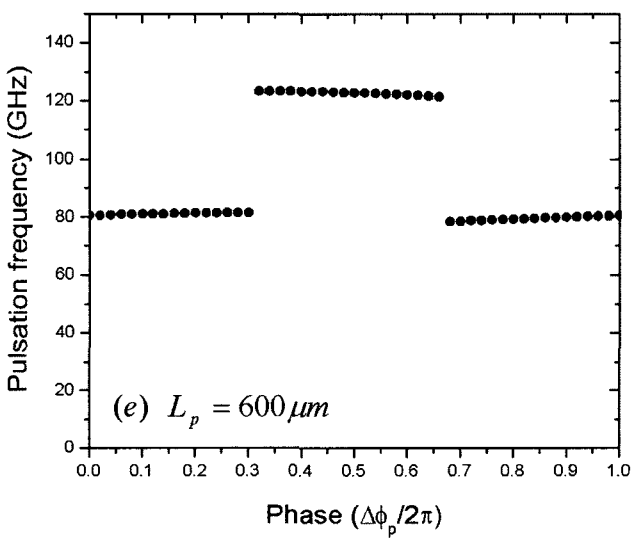
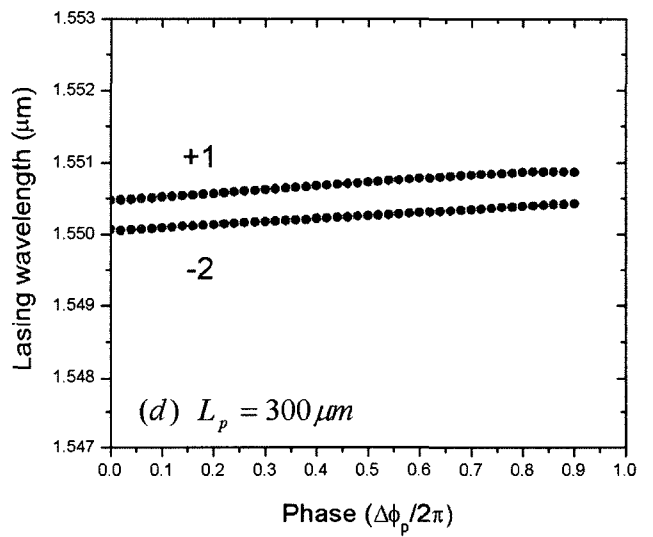
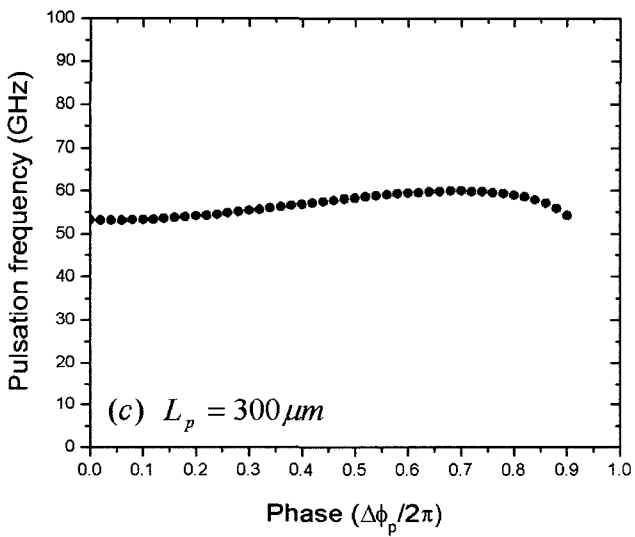
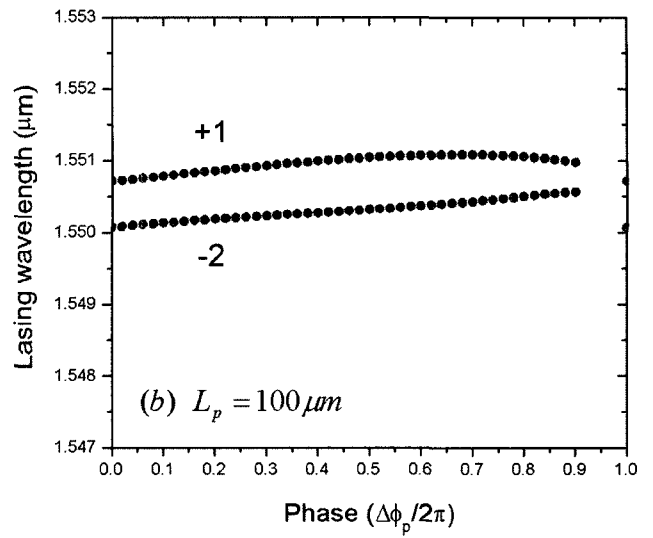
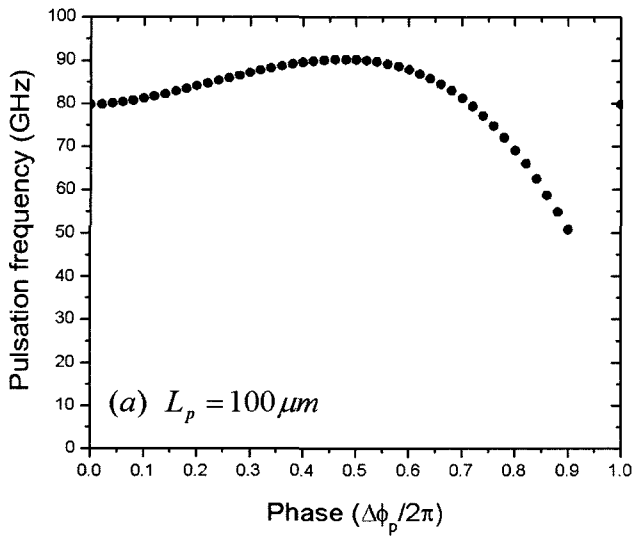


그림 7. 위상 조정 영역의 위상 변화에 따른 pulsation 주파수와 발진 파장의 변화. $\Delta\lambda_B/\Delta = 0.6$, $xL_1 = xL_2 = 2$, $L_1 = L_2 = 300 \mu m$.

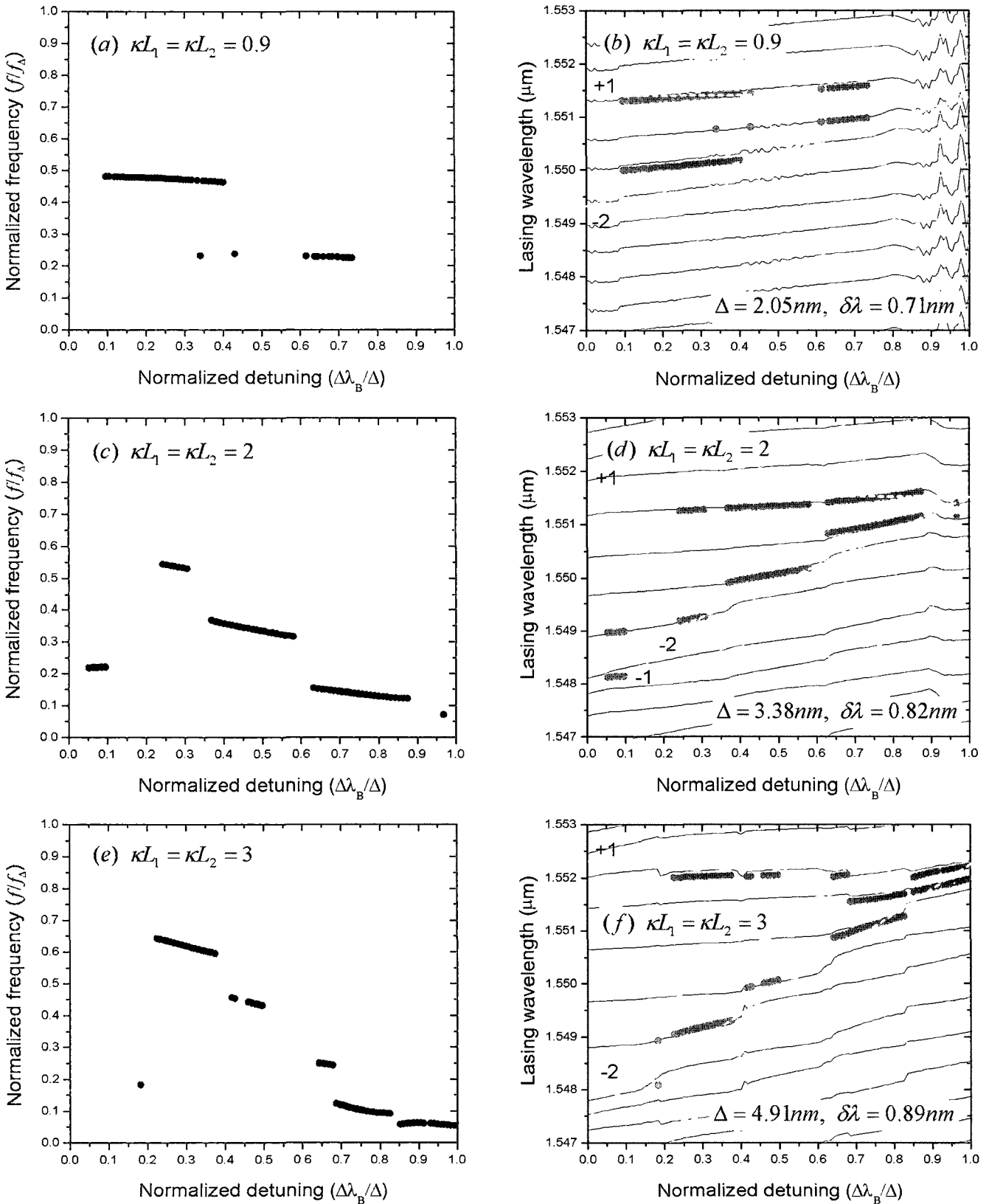


그림 8. 여러 가지 결합 세기에 대하여 정규화된 디튜닝의 함수로 도시한 정규화된 pulsation 주파수와 발진 파장. $L_1 = L_2 = 200 \mu\text{m}$, $L_p = 300 \mu\text{m}$.

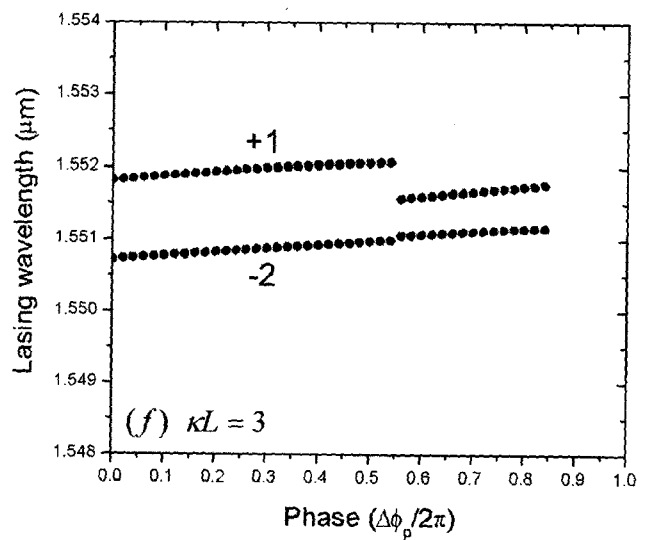
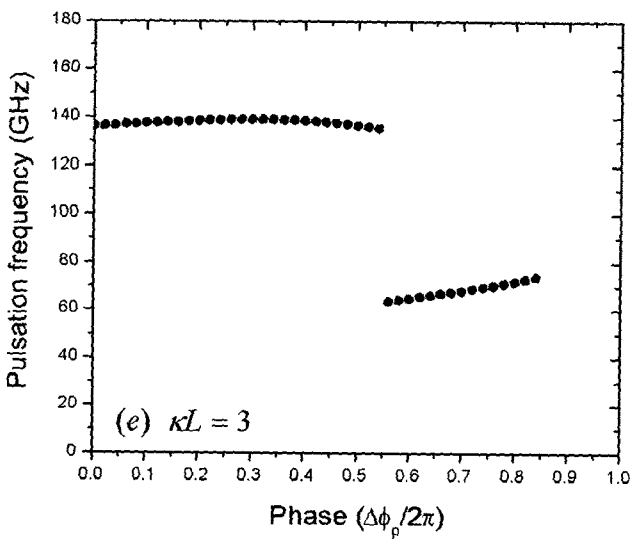
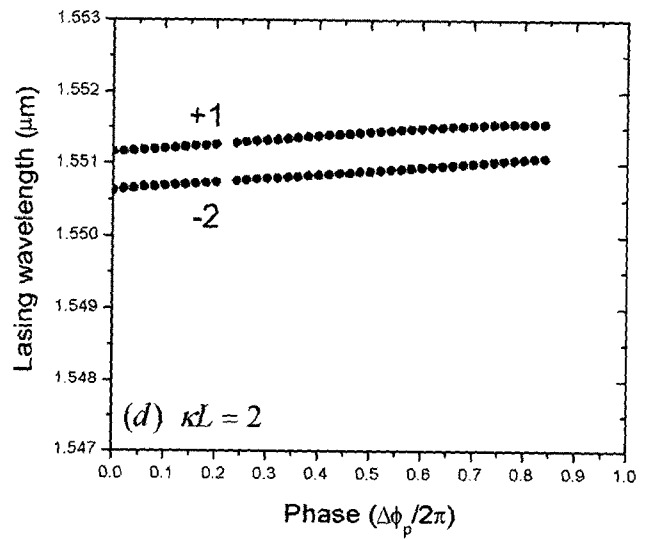
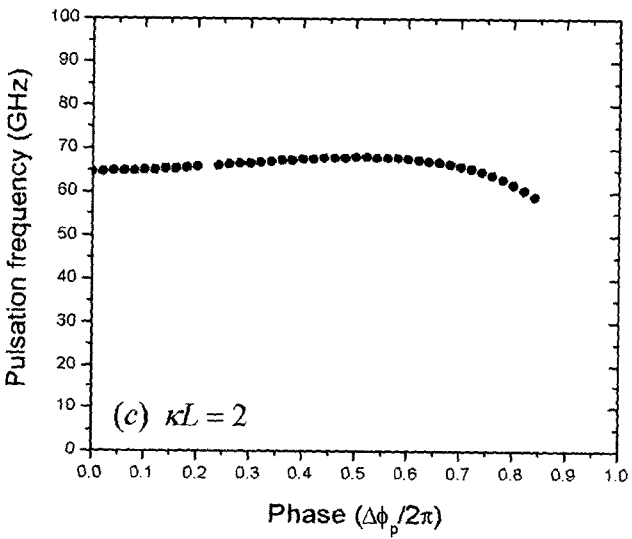
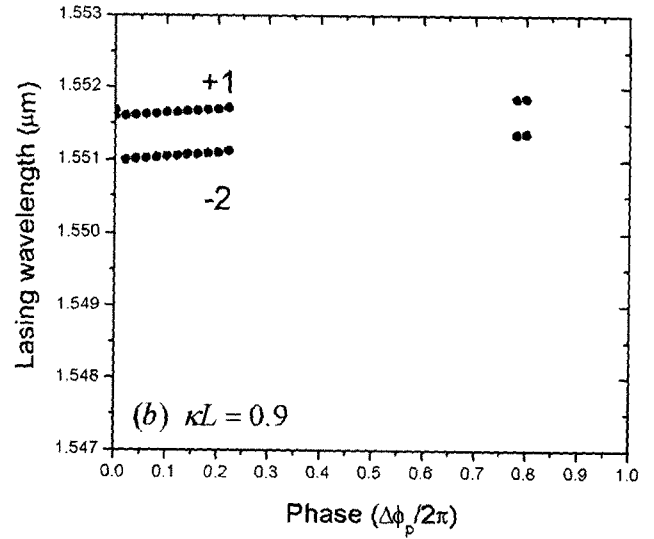
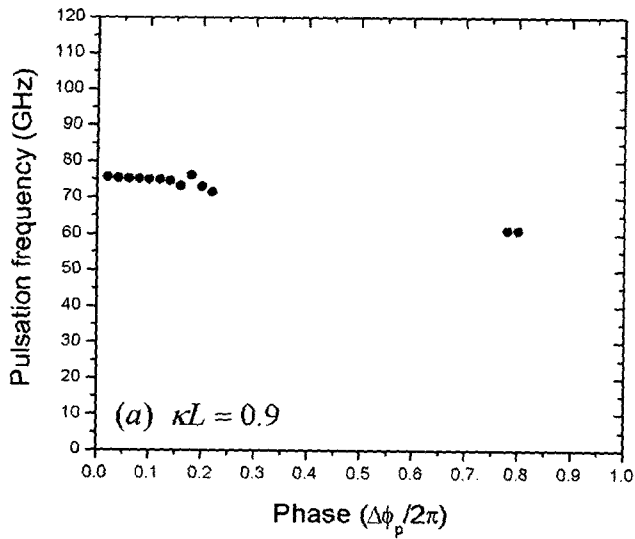


그림 9. 위상 조정 영역의 위상에 따른 pulsation 주파수와 발진 파장. $\Delta\lambda_B/\Delta = 0.7$, $L_1 = L_2 = 200 \mu m$, $L_p = 300 \mu m$.

가 많음을 알 수 있다. 결합 세기가 2인 경우 Δ/δ 는 4.1로 금지 대역폭 내에 존재하는 전체 공진기 모드 수는 4이다.

그림 9는 그림 8에서 $\Delta\lambda_B/\Delta$ 가 0.7일 때 위상 조정 영역의 위상 변화에 따른 pulsation 주파수와 발진 파장 변화를 나타내는 그림이다. xL 이 0.9인 그림 9(a)와 9(b)인 경우 pulsation 동작이 발생하는 위상 영역이 작음을 알 수 있다. 이는 xL 이 작은 경우 각각의 DFB 영역에서 발진하는 모드는 다른 DFB 영역으로부터 입력되는 필드의 영향을 크게 받아 발진 모드의 안정성이 저하되기 때문이라 생각된다. xL 이 2인 경우 대부분의 위상 영역에서 pulsation 동작이 발생하였고, 모드 호핑이 발생하지 않아 pulsation 주파수가 58 GHz에서 68 GHz까지 연속적으로 변화하였다. xL 이 3인 그림 9(e)와 9(f)인 경우 위상 조정 영역의 정규화된 위상이 약 0.55인 부근에서 +1 모드의 호핑이 발생하였다. 이로 인하여 pulsation 주파수는 75 GHz 대역과 140 GHz 대역에서 나타남을 알 수 있다.

VI. 결 론

두 개의 DFB 영역과 위상 조정 영역으로 구성된 다중 전극 IC DFB 레이저에서 모드 비팅에 의해서 발생하는 pulsation 동작 특성에 대하여 살펴보았다. 다중 전극 DFB 레이저에서 두 DFB 영역의 브래그 파장 차이인 $\Delta\lambda_B$ 의 변화 및 위상 조정 영역에서 위상 변화에 따라 발생하는 모드 호핑에 의해 pulsation 주파수가 급격하게 변화하는 특성을 금지 대역폭 내에 존재하는 전체 공진기 모드 수의 관점에서 해석하고 pulsation 동작 특성을 예측하였다.

금지 대역폭 내에 존재하는 전체 공진기 모드의 수는 결합 계수가 커질수록, DFB 영역의 길이가 작을수록, 위상 조정 영역의 길이가 클수록 증가한다. 따라서 결합 세기 및 각 영역의 길이를 조정하면 금지 대역폭 내에 존재하는 전체 공진기 모드의 수를 줄일 수 있고, 정규화된 디튜닝 또는 위상 조정 영역의 위상 변화에 따라 모드 호핑이 발생하지 않아 안정된 pulsation 동작을 얻을 수 있으리라 생각된다.

본 논문에서 계산한 결과 결합 세기는 2, DFB 영역의 길이는 300 μm , 위상 조정 영역의 길이는 100 μm 인 경우가 $\Delta\lambda_B$ 에 따른 pulsation 동작이 모드 호핑이 발생하지 않았고, 고정된 $\Delta\lambda_B$ 에 대하여 위상 조정 영역의 위상 변화에도 모드 호핑이 발생되지 않는 안정된 pulsation 동작을 얻을 수 있었다. 이 경우 위상 조정 영역의 위상 변화에 따른 pulsation 주파수의 튜닝 범위는 약 40 GHz 이었다.

감사의 글

본 연구는 학술진흥재단 선도연구지원사업(2003-041-D00438), 한국과학재단 목적기초연구(R01-2003-000-10231-0)와 광주과학기술원 초고속광네트워크연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] M. Saruwatari, "All-optical signal processing for terabit/second optical transmission," *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, vol. 6, no. 6, pp. 1363-1374, 2000.
- [2] C. Bornholdt, S. Bauer, M. Möhrle, H.-P. Nolting, and B. Sartorius, "All-optical clock recovery at 80 GHz and beyond," in *Proc. ECOC*, Amsterdam, NL, pp. 502-503, 2001.
- [3] S. Arahira, S. Sasaki, K. Tachibana, and Y. Ogawa, "All-optical 160-Gb/s clock extraction with a mode-locked laser diode module," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 16, pp. 1558-1560, 2004.
- [4] C. Bornholdt, B. Sartorius, S. Schelbase, M. Möhrle, and S. Bauer, "Self-pulsating DFB laser for all-optical clock recovery at 40 Gbit/s," *Electron. Lett.*, vol. 36, no. 4, pp. 327-328, 2000.
- [5] 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.
- [6] M. Al-Mumin, X. Wang, W. Mao, S. A. Pappert, and G. Li, "Optical generation and sideband injection locking of tunable 11-120 GHz microwave/millimeter signals," *Electron. Lett.*, vol. 36, no. 18, pp. 1547-1548, 2000.
- [7] M. Möhrle, B. Sartorius, C. Bornholdt, S. Bauer, O. Brox, A. Sigmund, R. Steingrüber, M. Radziunas, and H.-J. Wünsche, "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.
- [8] U. Bandelow and H.-J. Wünsche, "Dispersive self-Q-switching in self-pulsating in DFB lasers-theory versus experiment," *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, vol. 3, no. 2, pp. 270-278, 1997.
- [9] O. Brox, S. Bauer, M. Radziunas, M. Wolfrum, J. Sieber, J. Kreissl, B. Sartorius, and H.-J. Wünsche, "High-frequency pulsations in DFB lasers with amplified feedback," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 39, pp. 1381-1387, 2003.
- [10] M. Radziunas, H.-J. Wünsche, B. Sartorius, O. Brox, D. Hoffmann, K. R. Schneider, and D. Marcenac, "Modeling self-pulsating DFB lasers with an integrated phase tuning section," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 36, pp. 1026-1034, 2000.
- [11] H.-J. Wünsche, M. Radziunas, S. Bauer, O. Brox, and B. Sartorius, "Modeling of mode control and noise in self-pulsating PhaseCOMB lasers," *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, vol. 9, no. 3, pp. 857-864, 2003.
- [12] 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.
- [13] J. E. Carroll, J. Whiteaway, and D. Plumb, *Distributed feedback semiconductor lasers*, SPIE, London, Ch. 7, 1998.
- [14] H.-S. Lee, H. K. Kim, B.-G. Kim, and B. 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 Opt. Technol. Lett.*, vol. 27, pp. 396-400, 2000.
- [15] L. A. Coldren and S. W. Corzine, *Diode lasers and photonic integrated circuits*, New York: John Wiley & Sons, Inc. 1995.
- [16] J. Willems, K. David, G. Morthier, and R. Baets, "Filter characteristics of DBR amplifier with index and gain coupling," *Electron. Lett.*, vol. 27, no. 10, pp. 831-833, 1991.
- [17] M. Kuznetsov, "Theory of wavelength tuning in two-segment distributed feedback lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 24, no. 9, pp. 1837-1844, 1998.

Effect of varying the coupling strength and section length on the self-pulsation characteristics of multisection index-coupled DFB lasers

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

School of Electronic Engineering, Soongsil University, Seoul, Korea

[†]*E-mail: bgkim@e.ssu.ac.kr*

(Received October 13, 2004, Revised manuscript January 27, 2005)

As the number of compound cavity modes within the stopband of DFB sections decreases, the frequency of mode hopping decreases for the variation of $\Delta\lambda_B$, which represents the difference between the Bragg wavelengths of two DFB sections, so that the number of abrupt changes of pulsation frequencies decreases. In addition, the pulsation frequency varies continuously for the variation of the phase in a phase tuning section for a fixed $\Delta\lambda_B$. The number of compound cavity modes within the stopband decreases as the length of DFB sections increases and the length of a phase tuning section decreases. Thus stable self-pulsation operations for the variation of $\Delta\lambda_B$ and the phase in a phase tuning section could be obtained by proper selection of the coupling strength and the length of each section.

OCIS Codes : 140.3490, 140.5960, 140.2020.