《연구논문》 Hankook Kwanghak Hoeji, Volume 18, Number 1, February 2007

이득 분산이 다중 영역 복소 결합 DFB 레이저의 Self-Pulsation 특성에 미치는 효과

김태영 · 김부균†

숭실대학교 정보통신전자공학부

㉾ 156-743 서울시 동작구 상도동 511

(2006년 10월 13일 받음, 2007년 1월 9일 수정본 받음)

이득 분산이 두 개의 복소 결합 DFB 영역과 위상조정 영역으로 구성되는 다중 영역 복소 결합 DFB 레이저에서 발진하는 두 모드의 비팅에 의한 self-pulsation (SP) 주파수와 출력 파워의 변조지수에 미치는 영향에 대하여 살펴보았다. 능동 영역의 이득이 최대가 되는 파장을 두 DFB 영역의 발진 모드의 파장 중심 또는 브래그 파장 중심에 위치시킨 경우가 특정 DFB 영역의 발진 모드의 파장 또는 브래그 파장에 위치시킨 경우에 비하여 두 DFB 영역의 브래그 파장 차이, $\triangle\lambda_B$, 증가에 따른 두 발진 모드가 받는 이득 차이가 적게 발생하여 최대 SP 주파수가 크고, 변조지수 특성도 좋음을 볼 수 있었다. 또한 능동 영역의 이득이 최대가 되는 파장을 두 DFB 영역의 브래그 파장 중심에 위치시키는 경우가 발진 모드의 파장 중심에 위치시키는 경우에 비하여 더 큰 최대 SP 주파수를 얻을 수 있었고 변조지수 특성도 더 우수함을 볼 수 있었다.

주제어 : Gain spectrum, Multisection DFB laser, Optical terahertz wave, Photomixing methods, Dual mode laser, High modulation index

I. 서 론

두 개의 DFB 영역과 위상 조정 영역으로 구성된 다중 영역 DFB 레이저는 두 DFB 영역의 회절격자 주기 차이를 조절함으로써 각각의 DFB 영역에서 발진하는 두 모드의 비팅에 의해 생성되는 Self-Pulsation(SP) 주파수를 변화시킬 수 있으며 또한 주입 전류에 의해서 생성되는 SP 주파수를 조정할 수 있다는 장점을 가지고 있다.[1,2] 이러한 다중 영역 DFB 레이저는 차세대 광 대역 무선 통신 시스템에서 광 밀리미터파 생성을 위한 핵심 소자일 뿐만 아니라 완전 광 네트워크 구현을 위하여 필요한 광 신호 복구와 광 신호 처리를 위한 핵심소자이다.[3,4] 또한 최근 신호원 개발의 어려움으로 상대적으로 낙후된 100 GHz~10 THz 주파수 영역에 존재하는 테라헤르츠(THz) 파 대역의 신호를 발생시키는 여기 광원으로 사용 가능하리라 예상된다.[5,6]

테라헤르츠 파 측정 기술은 전파 천문학 관측과 유기 분자들을 검출하는 분광학 응용에 매우 중요하게 사용된다. 또한 테라헤르츠 파는 X선보다 생체에 안전하기 때문에 테라헤르츠 파를 이용한 영상 시스템은 생체 내 의학적 이미징 작업에 광범위하게 사용되리라 예상된다. 그리고 비파괴 검사와 보안검사에도 널리 사용되리라 예상된다.[5] 위와 같은 많은 응용 분야를 가지고 있기 때문에 미국, 일본과 유럽 각국에서는 테라헤르츠 파 생성 및 검출 기술과 영상시스템 구현에 관한 많은 연구가 최근 폭발적으로 이루어지고 있다.

테라헤르츠 파를 생성하는 방법 중 하나인 Photomixing 방법을 이용하여 생성되는 테라헤르츠 파의 특성은 사용되는 파장이 다른 두 레이저 빔의 특성에 의해 결정된다.[6] 따라서 파장이 다른 두개의 모드를 방출하는 레이저를 monolithic하게 구현하는 연구가 진행되고 있다.[7] 본 연구팀은 발진하는 두 모드의 주파수 차이가 테라헤르츠 파 영역까지 가능한 레이저를 구현하기 위하여 Complex-coupled(CC) DFB 구조를 가지는 두 개의 DFB 영역과 위상 조정 영역으로 구성된 다중 영역 DFB 레이저를 제안하고 두 DFB 영역의 격자 주기 차이를 조정하여 발진하는 두 모드의 주파수 차이가 매우 낮은 주파수에서 테라헤르츠 파 영역까지 안정되게 동작됨을 전산 모의를 통하여 확인하였다. 두 CC DFB 영역의 회절격자 구조가 in-phase(IP) 회절격자를 가지는 경우가 anti-phase(AP) 회절격자를 가지는 경우에 비하여 발생하는 SP 주파수의 최대값이 큼을 볼 수 있었다.[8]

참고문헌 [8]에서는 두 DFB 영역의 발진 모드의 파장 중심에 능동 영역 (active medium) 의 이득 스펙트럼에서 최대 이득을 가지는 파장 (λ_P) 을 위치시키고 두 회절격자의 브래그 파장을 대칭적으로 변화시켜 두 발진 모드의 비팅에 의하여 발생하는 SP 특성을 보고하였다. 이 경우 두 DFB 영역의 브래그 파장 차이, $\triangle\lambda_B$, 가 커지면 두 발진 모드의 주파수 차이가 매우 커 능동 영역의 이득 스펙트럼으로부터 발진 모드가 가지는 이득이 SP 주파수의 최대값과 출력 파워의 변조지수에 미치는 영향이 큼을 볼 수 있었다.

본 논문에서는 두 CC DFB 영역의 회절격자 구조가 IP 회절격자를 가지는 경우, 이득 분산이 다중 영역 복소 결합 DFB 레이저에서 발진하는 두 모드의 비팅에 의한 SP 특성을 알아보았다. 능동 영역의 이득이 최대가 되는 파장을 두 DFB 영역의 발진 모드의 파장 중심 또는 브래그 파장 중심에 위치시킨 경우와 특정 DFB 영역의 발진 모드의 파장 또

† E-mail: bgkim@e.ssu.ac.kr

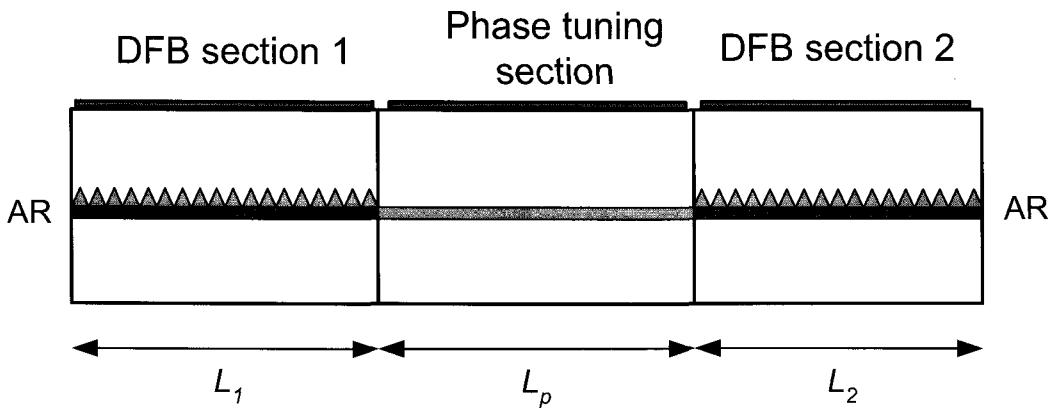

그림 1. 두 개의 DFB 영역과 위상 조정 영역으로 구성된 다중 영역 DFB 레이저의 개념도.

는 브래그 파장에 위치시킨 경우에 $\triangle\lambda_B$ 변화에 따른 SP 주파수의 최대값과 출력 파워의 변조지수 특성에 대한 결과를 보고한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 다중 영역 DFB 레이저의 동적 특성해석에 사용한 전산 모의 방법에 대하여 간단히 살펴본다. 3장에서 다중 영역 CC DFB 레이저에서 모드 비팅으로 인하여 발생하는 SP 주파수와 출력 파워의 변조지수에 대하여 알아본다. 4장에서 두 DFB 영역의 발진 모드의 파장 또는 브래그 파장이 능동 영역의 이득이 최대가 되는 파장과 가지는 여러 가지 경우에 대하여 발진하는 두 모드의 비팅에 의한 SP 주파수의 최대값과 출력 파워의 변조지수 특성에 대하여 알아본다. 마지막으로 5장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 전산 모의 방법

두 개의 모드를 방출하는 다중 영역 DFB 레이저의 동작 특성을 살펴보기 위하여 시간 영역 모델을 사용하였다. 시간 영역 모델은 순방향으로 진행하는 필드와 역방향으로 진행하는 필드의 상호 결합 현상을 나타내는 시간 의존 결합 모드 방정식과, 광자와 상호 작용을 하는 캐리어의 밀도 변화를 나타내는 비율 방정식을 시간 영역에서 해석한 것으로 자세한 수식은 참고문헌 [8]에 기술되어 있다.

반도체 매질에서 이득은 캐리어 밀도뿐만 아니라 파장에 따라 변화한다. 이러한 파장에 따른 이득 변화는 Lorentzian 함수로 근사할 수 있고 그 수식은 다음과 같다.[9]

$$g(\omega,N)=\frac{\Gamma g_N(N-N_0)}{2(1+\epsilon S)}\frac{1}{1+j\tau(\omega-\omega_p)} \tag{1}$$

여기서 Γ는 도파로 구속 인자, g_N은 미분 이득, ϵ은 비선형 이득 억제 계수, τ는 이득 스펙트럼의 대역폭을 결정하는 상수이고 ω_p는 최대 이득을 갖는 각 주파수이며 캐리어 밀도에 따른 변화는 다음 수식과 같이 표현된다.

$$\omega_p(N)=\omega_{p0}+\frac{\partial\omega_p}{\partial N}(N-N_0) \tag{2}$$

여기서 ω_{p0}는 캐리어 밀도 N이 투명 캐리어 밀도 N_0일 때 최대 이득을 갖는 각 주파수이다. 전산모의 수행 시 이러한 캐리어 밀도뿐만 아니라 파장에 따라 변화하는 이득 분산을 고려하기 위하여 디지털 필터 기법을 사용하였다.[9]

시간 영역과 공간 영역에서 결합 방정식과 비율 방정식의 수치 계산의 효율성과 정확성을 위해 연산자 분리 시 영역 모델을 사용하였다.[10] 시간 영역 모델을 사용하여 구한 결과로부터 출력 파워, 광 스펙트럼 및 RF 스펙트럼과 변조 지수 등을 구하였다.

III. SP 주파수와 변조지수

그림 1은 두 개의 DFB 영역과 위상 조정 영역으로 구성된 다중 영역 DFB 레이저의 개념도를 나타낸다. 그림 2는 문턱 전류 이상에서 IP 회절격자를 가지는 두 CC DFB 영역의 반사 스펙트럼을 나타낸다. 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 $\triangle$는 DFB 영역의 금지 대역폭이고 λ_{B1}과 λ_{B2}는 각각 DFB 영역 1과 2의 브래그 파장 위치를 나타내며 $\triangle\lambda_B$는 두 DFB 영역의 브래그 파장 차이로 $\triangle\lambda_B=\lambda_{B2}-\lambda_{B1}$이다. IP 회절격자를 가지는 CC DFB 영역에서는 장파장 모드인 +1 모드와 +2 모드가 발진한다. 따라서 Index-coupled (IC) DFB 구조를 사용한 경우와는 다르게 $\triangle\lambda_B<\triangle$인 경우나 $\triangle\lambda_B>\triangle$인 경우에 관계없이 각각의 DFB 영역에서는 +1 모드와 +2 모드가 발진한다. 따라서 각각의 CC DFB 영역에서는 IC DFB 구조를 사용하는 경우에 비해 안정된 모드가 발진하고 이에 따라 안정된 두 개의 모드를 방출하는 동작이 발생하리라 예상된다. 또한 단파장 모드와 장파장 모드 사이에 발생되는 호핑으로 인한 두 모드의 파장 차이의

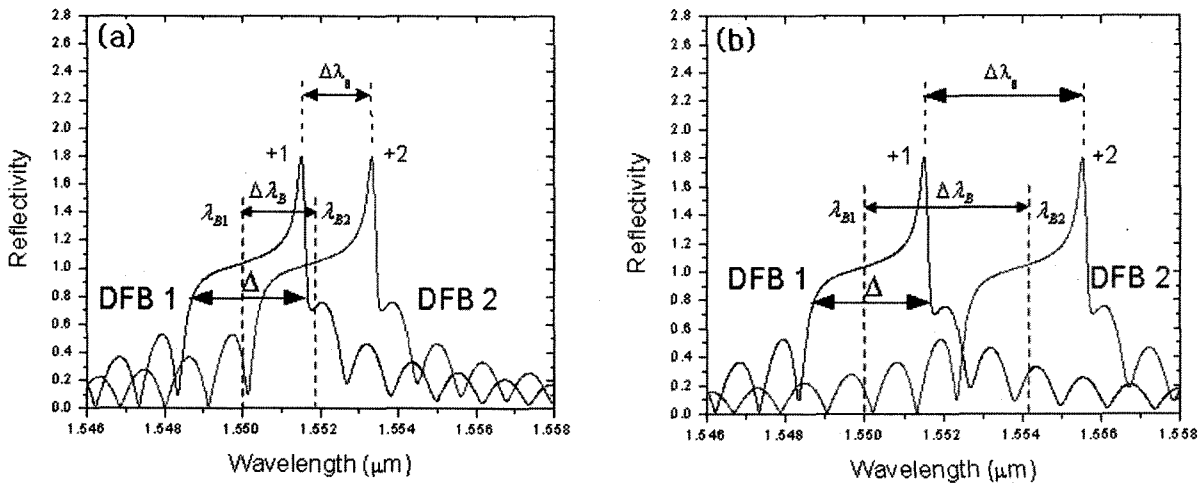

그림 2. 문턱 전류 이상에서 IP 회절격자를 가지는 두 CC DFB 영역의 반사 스펙트럼과 브래그 파장의 위치. (a) $\Delta > \Delta\lambda_B$, (b) $\Delta < \Delta\lambda_B$

급격한 변화도 발생하지 않으리라 예상된다. CC DFB 구조를 사용하는 다중 영역 DFB 레이저의 경우 +1 모드와 +2 모드의 모드 비팅에 의하여 발생되는 SP 주파수는 다음 수식과 같이 근사적으로 표현할 수 있다.

$$f = \frac{c}{\lambda_0^2} \triangle \lambda_B \tag{3}$$

여기서 λ_0는 기준 파장으로 1.55 μm 이고 c는 빛의 속도이다. 따라서 두 DFB 영역의 브래그 파장 차이 $\triangle\lambda_B$를 조정하면 발진하는 두 모드의 비팅에 의한 SP 주파수를 매우 넓은 영역에서 얻을 수 있음을 알 수 있다.

두 모드를 방출하는 다중 영역 DFB 레이저의 출력을 광대역 무선 통신 시스템과 광 신호 복구 및 광 신호 처리에 사용하기 위해서, 밀리미터파 신호와 테라헤르츠파 신호를 photomixing 방법에 의하여 효과적으로 얻기 위해서는 광 출력에서 모드 비팅에 의한 SP 신호의 크기의 비를 나타내는 지수인 변조지수가 커야 한다.[6] 모드 비팅에 의한 SP 신호의 크기는 각각의 DFB 영역에서 발진하는 모드가 다른 DFB 영역으로 진행하여 발생하는 두 모드의 상호 작용의 정도에 의해 결정된다. 따라서 양 단면에서 출력 파워는 각각의 DFB 영역에서 두 모드의 상호 작용에 의한 것으로 참고문헌 [8] 의 식 6과 같이 표현된다. 각 단면에서의 출력 파워에 대한 변조지수는 다음 수식과 같이 표현된다.

$$m_L = \frac{P_{L,Max} - P_{L,Min}}{P_{L,Max} + P_{L,Min}} = \frac{2|b_1(0)b_2(0)|}{|b_1(0)|^2 + |b_2(0)|^2} \tag{4}$$

$$m_R = \frac{P_{R,Max} - P_{R,Min}}{P_{R,Max} + P_{R,Min}} = \frac{2|a_1(L)a_2(L)|}{|a_1(L)|^2 + |a_2(L)|^2}$$

여기서 $P_{L(R),Max}$와 $P_{L(R),Min}$은 각각 왼쪽 (오른쪽) 단면에서 출력 파워의 최대값과 최소값을, $b_1(0)$와 $b_2(0)$는 각각 왼쪽 단면에서 DFB 영역 1과 2에서 발진하는 모드의 정규화된 역방향 필드의 크기를 나타내고, $a_1(L)$과 $a_2(L)$은 각각 오른쪽 단면에서 DFB 영역 1과 2에서 발진하는 모드의 정규화된 순방향 필드의 크기를 나타낸다. 따라서 양 단면에서 출력 파워에 대한 변조지수를 크게 하기 위해서는 각각의 DFB 영역에서 발진 하는 모드가 다른 DFB 영역으로 진행하여 다른 DFB 영역에 존재하는 모드와 상호 작용을 하는 모드의 크기가 커야 한다.

IV. 이득 분산이 모드 비팅에 미치는 효과

그림 3은 DFB 영역의 이득 스펙트럼의 중심 파장이 IP 회절격자를 가지는 다중 영역 CC DFB 레이저의 각각의 DFB 영역의 발진 모드 파장 또는 브래그 파장과 가지는 6가지 경우를 보인다. 이득 스펙트럼은 문턱전류에서 full width half maximum (FWHM)이 5 THz인 Lorentzian 함수로 근사하였다.[11] 다중 영역 CC DFB 레이저의 특성을 전산 모의하기 위하여 파라미터 값들을 다음과 같이 설정하였다. 두 DFB 영역의 결합 세기의 크기는 3이고 coupling ratio(CR), κ_g / κ_i, 는 0.2 이다. 또한 각각의 DFB 영역과 위상 조정 영역의 길이는 300 μm이고, 각각의 DFB 영역의 주입 전류는 문턱전류(39mA)보다 30 mA 더 높게 주입하였고 위상 조정 영역의 위상은 0으로 고정하고 양 단면은 무반사 코팅 되었다고 가정하였다. 각각의 DFB 영역의 금지 대역폭 $\triangle$는 두 DFB 영역의 길이와 결합 계수가 같은 경우 근사적으로 식 (5)을 사용하여 구할 수 있고 본 논문의 경우에는 약 3.27 nm이다.

$$\triangle = \frac{\lambda_0^2}{n_e \pi} \frac{|\kappa L_D| \sqrt{2}}{\tanh(|\kappa L_D|)} \frac{1}{L_D} \tag{5}$$

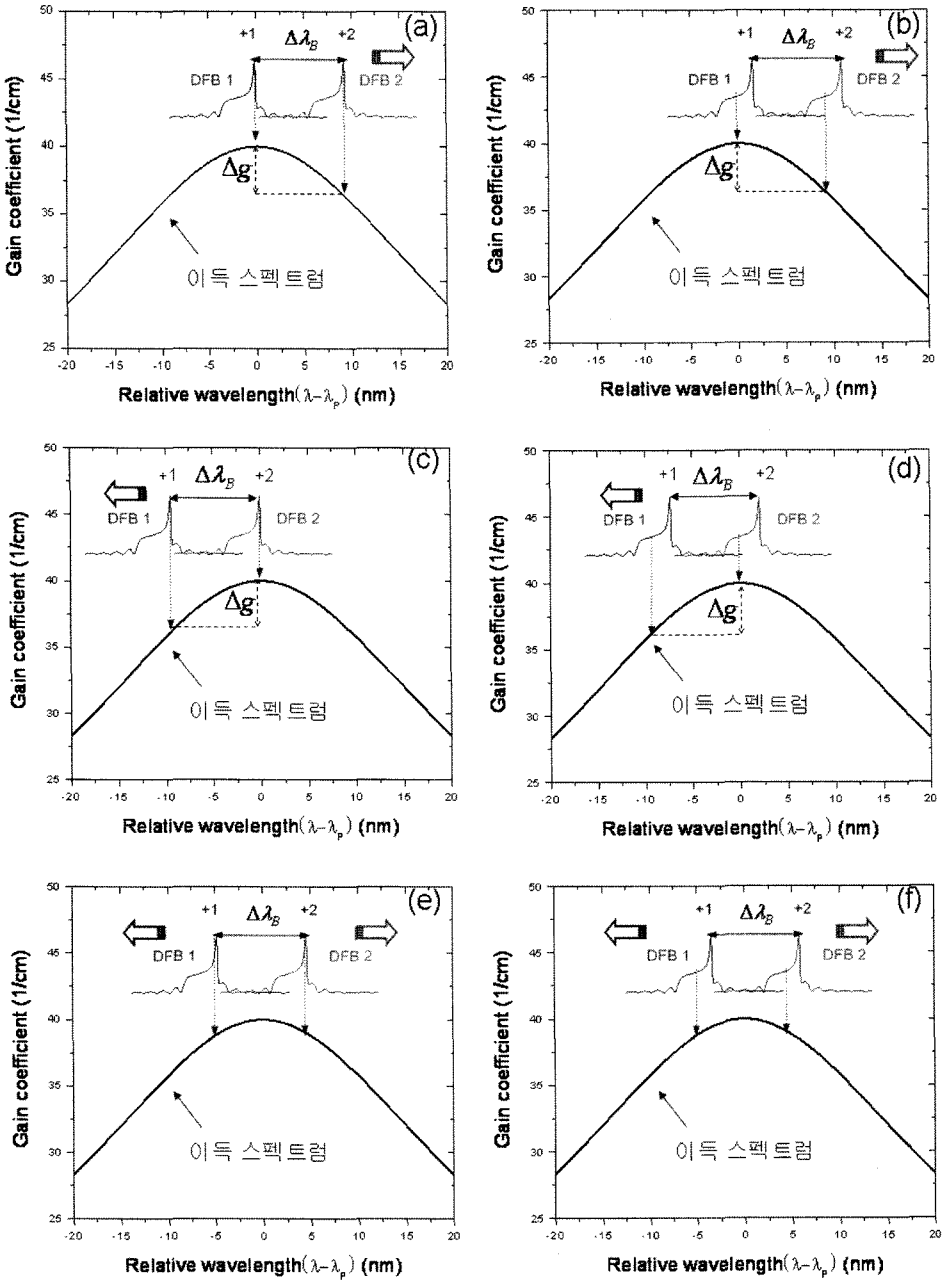

그림 3. 이득 스펙트럼과 두 DFB 영역의 반사 스펙트럼과의 여러 가지 관계. (a) DFB 영역 1의 발진 모드의 파장에 λ_P를 일치시킨 경우, (b) DFB 영역 1의 브래그 파장에 λ_P를 일치시킨 경우, (c) DFB 영역 2의 발진 모드의 파장에 λ_P를 일치시킨 경우, (d) DFB 영역 2의 브래그 파장에 λ_P를 일치시킨 경우, (e) 두 DFB 영역의 발진 파장 중심에 λ_P를 위치시킨 경우, (f) 두 DFB 영역의 브래그 파장 중심에 λ_P를 위치시킨 경우.

전산 모의에 사용한 나머지 파라미터 값은 표 1에 나타내었다. 다중 영역 DFB 레이저에서 파장이 다른 두 모드의 비팅에 의해서 안정된 SP 동작이 발생한다고 판단한 경우는 참고문헌 [8]에 나와 있는 3가지 조건을 만족하는 경우이다.

그림 3 (a)와 (b)는 각각 DFB 영역 1의 발진 모드의 파장과 브래그 파장을 λ_P에 일치시키고 DFB 영역 2의 브래그 파장만 증가시켜 두 DFB 영역의 $\triangle\lambda_B$를 증가시킨 경우이다. 그림 3 (b) 경우가 그림 3 (a) 경우보다 DFB 영역 2의 발진 모드의 이득이 빨리 감소하여 최대 SP 주파수는 작아질 것이다.

그림 3 (c)와 (d)는 각각 DFB 영역 2의 발진 모드의 파장과 브래그 파장을 λ_P에 일치시키고 DFB 영역 1의 브래그 파장만 감소시켜 두 DFB 영역의 $\triangle\lambda_B$를 증가시킨 경우이다. 그림 3 (c) 경우가 그림 3 (d) 경우보다 DFB 영역 1의 발

진 모드의 이득이 빨리 감소하여 최대 SP 주파수는 작아질 것이다.

그림 3 (e)와 (f)는 λ_P를 각각 두 DFB 영역의 발진 파장 중심과 브래그 파장 중심에 위치시키고 두 DFB 영역의 브래그 파장을 대칭적으로 변화시켜 두 DFB 영역의 $\triangle\lambda_B$를 증가시킨 경우이다. 따라서 두 DFB 영역의 발진 모드는 $\triangle\lambda_B$에 상관없이 비슷한 크기의 이득을 받아 발진하는 두 모드의 파워가 비슷하여 그림 3 (a)-(d)의 경우보다 양 단면의 변조 지수가 크고 큰 최대 SP 주파수를 얻을 수 있을 것이다.

표 1. 계산에 사용된 파라미터

파라미터	값	단 위	의 미
d	0.2	μm	활성층 영역의 두께
w	2	μm	활성층 영역의 폭
n_e	3.32		유효 굴절율
ng	3.7		군 굴절율
A	1	$10^8 s^{-1}$	선형 재결합 계수
B	1	$10^{-16} m^3 s^{-1}$	자발 재결합 계수
C	0.75	$10^{-40} m^6 s^{-1}$	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	20×102	m^{-1}	손실
g_N	2.5	$10^{-20} m^{-2}$	미분 이득
ϵ	4	$10^{-23} m^3$	비선형 이득 억제 계수

그림 4 (a)와 (b)는 각각 DFB 영역 1의 발진 모드인 +1 모드의 파장에 λ_P를 일치시키고 $\triangle\lambda_B$ 변화에 따른 SP 주파수와 양 단면에서 출력 파워의 변조 지수를 보인다. 그림 4(a)에서 보면 각각의 DFB 영역에서 발진하는 모드는 전체 공진기에 대한 경계 조건을 만족하여야 하고 다른 DFB 영역으로부터 반사되는 필드의 영향을 받으므로 $\triangle\lambda_B$가 증가할 때 모드 호핑이 발생하는 점들이 발생하여 SP 주파수가 불연속적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 발생된 최대 SP 주파수는 약 1.36 THz이다.

그림 4 (b)에서 보면 DFB 영역 1의 발진 모드의 파장에 λ_P를 일치시켰기 때문에 $\triangle\lambda_B$가 증가하여도 DFB 영역 1의 +1 모드가 받는 이득은 변하지 않지만 DFB 영역 2의 +2 모드가 받는 이득은 감소하여 $\triangle\lambda_B$가 증가함에 따라 +1 모드와 +2 모드의 파워 차이가 증가하여 변조지수는 전체적으로

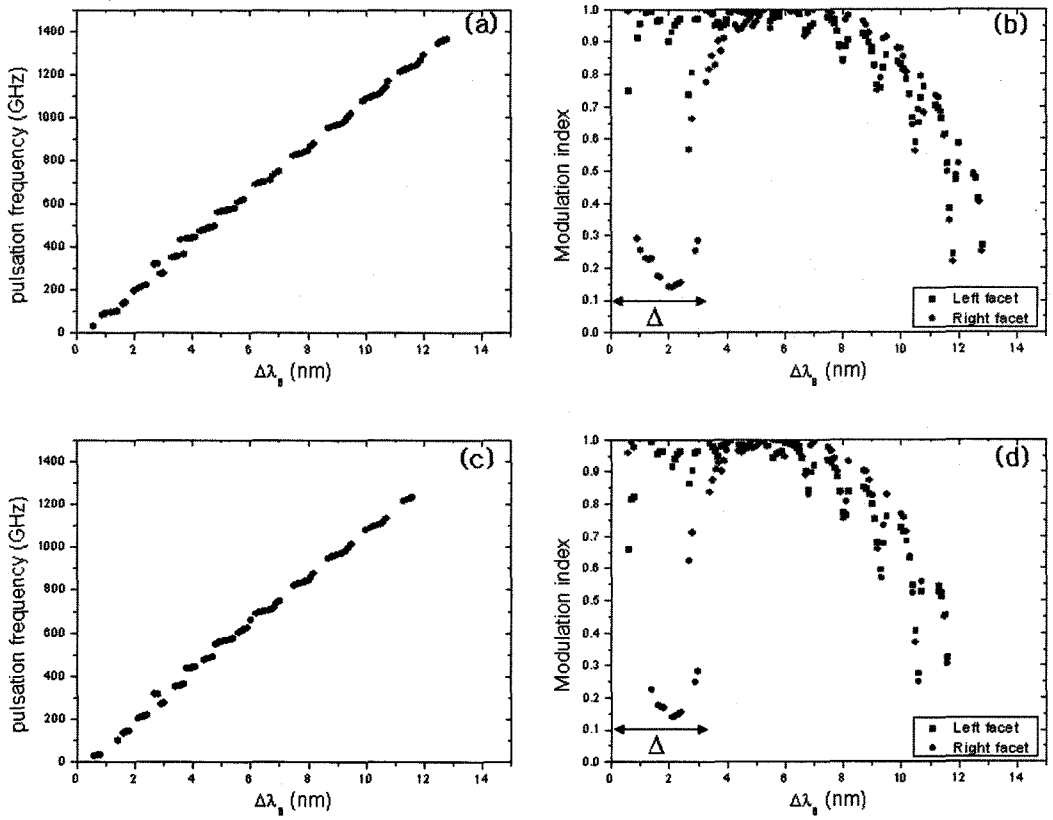

그림 4. DFB 영역 1의 발진 모드인 +1 모드의 파장에 λ_P를 일치시키고 구한 $\triangle\lambda_B$ 변화에 따른 (a) SP 주파수, (b) 양 단면에서 출력 파워의 변조지수. DFB 영역 1의 브래그 파장(1550nm)에 λ_P를 일치시키고 구한 $\triangle\lambda_B$ 변화에 따른 (c) SP 주파수, (d) 양 단면에서 출력 파워의 변조 지수.

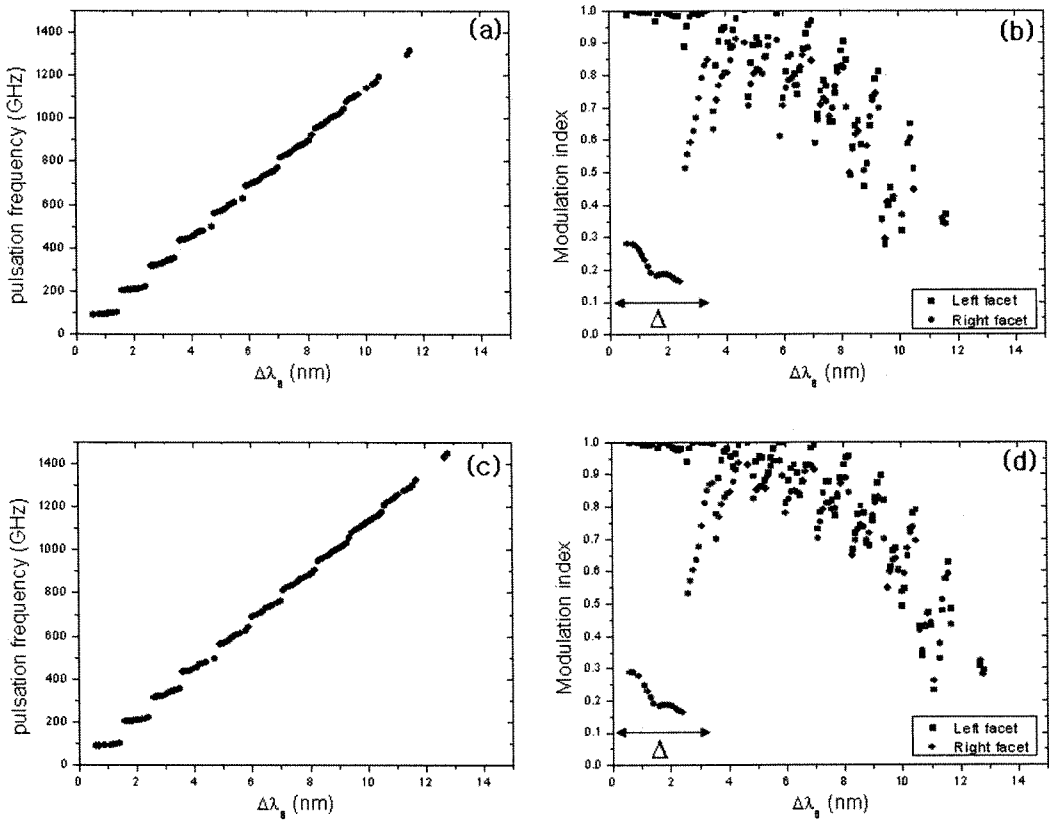

그림 5. DFB 영역 2의 발진 모드인 +2 모드의 파장에 λ_P를 일치시키고 구한 $\triangle\lambda_B$ 변화에 따른 (a) SP 주파수, (b) 양 단면에서 출력 파워의 변조지수. DFB 영역 2의 브래그 파장(1550nm)에 λ_P를 일치시키고 구한 $\triangle\lambda_B$ 변화에 따른 (c) SP 주파수, (d) 양 단면에서 출력 파워의 변조 지수.

감소하는 것을 볼 수 있다. $\triangle\lambda_B < \triangle$ 인 영역에서는 DFB 영역 1의 +1 모드가 DFB 영역 2의 금지대역 내에 존재하여 DFB 영역 2로 진행이 작게 발생하여 오른쪽 단면에서 +1 모드와 +2 모드의 출력 파워 차이가 커 오른쪽 단면의 변조지수는 작게 나타난다. 금지대역이 중첩되지 않는 $\triangle\lambda_B > \triangle$ 인 영역에서는 $\triangle\lambda_B$가 증가함에 따라 DFB 영역 1에서 출력파워가 상대적으로 큰 +1 모드가 DFB 영역 2로 진행하여 DFB 영역 2에 주입된 캐리어를 많이 소모하기 때문에 DFB 영역 2에서 이득이 상대적으로 작은 +2 모드의 발진을 저해한다. 따라서 $\triangle\lambda_B$가 13 nm 이상인 경우 두 발진 모드의 파워 차이가 커져 변조지수가 0.1 이하로 작아져서 안정된 SP 동작 조건을 만족하지 못한다.

그림 4 (c)와 (d)는 각각 DFB 영역 1의 브래그 파장(1550nm)에 λ_P를 일치시키고 구한 $\triangle\lambda_B$ 변화에 따른 SP 주파수와 변조 지수를 나타낸다. 그림 4 (c)를 보면 그림 4 (a)와 비슷한 경향을 보이나 최대 SP 주파수가 상대적으로 작은 약 1.23 THz이다. 그 이유는 그림 3 (a)의 경우가 그림 3 (b)의 경우보다 DFB 영역 2의 발진 모드의 파장이 λ_P에 금지대역폭의 반 정도 더 가깝게 위치하기 때문이다. 따라서 그림 3 (a)의 경우가 그림 3 (b)의 경우보다 $\triangle\lambda_B$가 금지대역 폭의 반인 약 1.6 nm 더 증가할 동안 안정된 SP 동작이 발생하기 때문이라 생각된다. 그림 4 (d)의 $\triangle\lambda_B$ 변화에 따른 양 단면에서 출력 파워의 변조지수는 그림 4 (b)와 비슷함을 볼 수 있다.

그림 5 (a)와 (b)는 각각 DFB 영역 2의 발진 모드인 +2 모드의 파장에 λ_P를 일치시키고 구한 $\triangle\lambda_B$ 변화에 따른 SP 주파수와 출력 파워의 변조 지수를 나타낸다. 그림 5 (a)에서 보면 $\triangle\lambda_B$가 증가함에 따라 그림 4 (a)와 같이 모드 호핑이 발생하는 점들이 발생하여 SP 주파수가 불연속적으로 증가하는 것을 볼 수 있고 최대 SP 주파수는 약 1.32 THz이다.

대칭 구조를 가지는 그림 4 (a)의 경우와 비교하여 최대 SP 주파수가 작은 이유는 다음과 같다고 생각된다. $\triangle\lambda_B$가 커지면 발진하는 모드가 받는 이득이 감소하여 캐리어 밀도가 증가한다. 따라서 SHB 효과가 증가하여 발진 모드의 파장이 단파장 쪽으로 이동하려고 한다. 그림 3에서 보듯이 DFB 영역 2의 경우는 장파장 모드가 단파장 모드 보다 작은 이득을 가지는 반면 DFB 영역 1의 경우는 그 반대이다. 따라서 DFB 영역 2의 경우는 단파장 모드가 장파장 모드 보다 더 큰 이득을 이득 스펙트럼으로부터 가지기 때문에 $\triangle\lambda_B$가 증가하면 SHB 효과에 의하여 발진 파장이 장파장에서 단파장으로 자연스럽게 이동한다. 그러나 DFB 영역 1의 경우는 장파장 모드가 단파장 모드 보다 더 큰 이득을 이득 스펙트

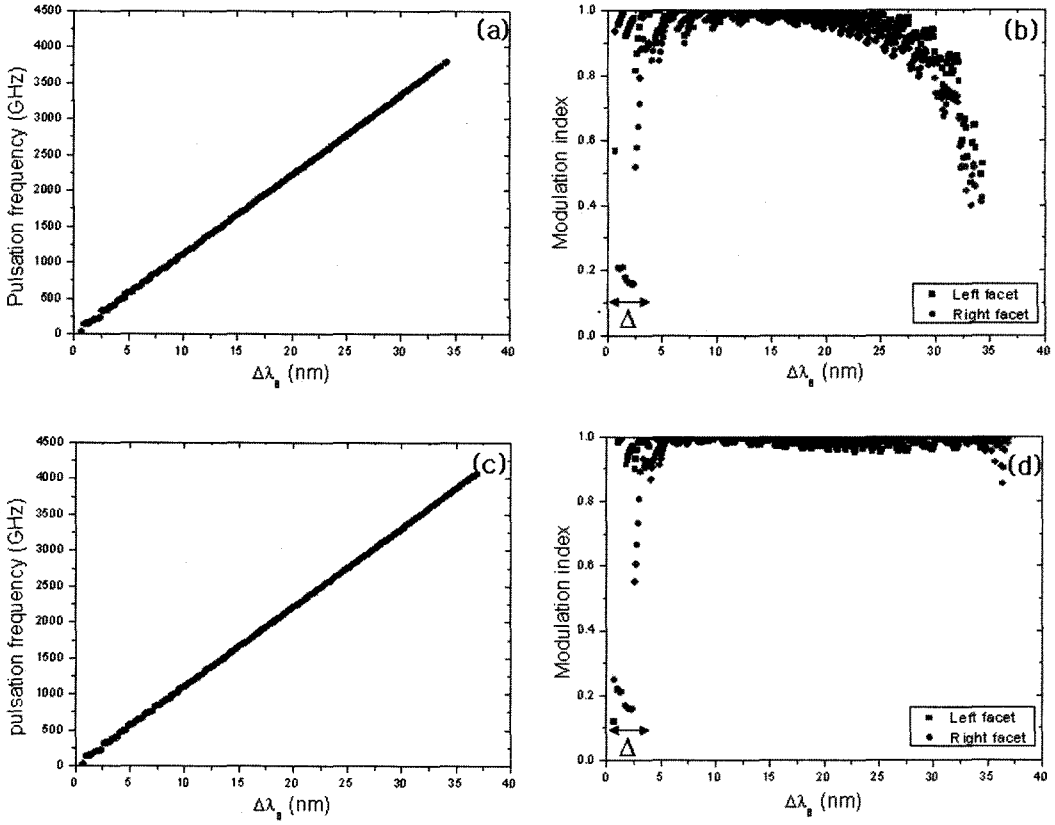

그림 6. 두 DFB 영역의 발진 모드의 파장 중심에 λ_P를 위치시키고 두 DFB 영역의 발진 파장을 대칭으로 변화시켜 구한 $\triangle\lambda_B$ 변화에 따른 (a) SP 주파수, (b) 양 단면에서 출력 파워의 변조지수. 두 DFB 영역의 브래그 파장 중심에 λ_P를 위치시키고 두 DFB 영역의 브래그 파장을 대칭적으로 변화시켜 구한 $\triangle\lambda_B$ 변화에 따른 (c) SP 주파수, (d) 양 단면에서 출력 파워의 변조 지수.

럼으로부터 가지기 때문에 $\triangle\lambda_B$가 증가하여 SHB 효과가 발생하여도 장파장 모드만 발생하게 된다. 따라서 그림 3 (a)의 경우가 그림 3 (c)의 경우보다 더 큰 $\triangle\lambda_B$에서 안정된 SP 동작이 발생한다.

그림 5 (b)에서 보면 DFB 영역 2의 발진 파장을 λ_P에 일치시켰기 때문에 $\triangle\lambda_B$가 증가하여도 DFB 영역 2의 +2 모드가 받는 이득은 변하지 않지만 DFB 영역 1의 +1 모드가 받는 이득은 감소하여 $\triangle\lambda_B$가 증가함에 따라 +1 모드와 +2 모드의 파워 차이가 증가하여 변조지수는 전체적으로 감소하는 것을 볼 수 있다.

그림 5 (c)와 (d)는 각각 DFB 영역 2의 브래그 파장(1550nm)에 λ_P를 일치시키고 구한 $\triangle\lambda_B$ 변화에 따른 SP 주파수와 양 단면에서 출력 파워의 변조지수를 나타낸다. 그림 5 (a)에 비하여 금지대역 폭의 반만큼 큰 $\triangle\lambda_B$까지 SP 동작이 발생하여 최대 SP 주파수는 약 1.45 THz 이다. 그림 5 (d)는 그림 5 (b)와 비슷함을 볼 수 있다.

그림 6 (a)와 (b)는 각각 두 DFB 영역의 발진 파장 중심에 λ_P를 위치시키고 두 DFB 영역의 브래그 파장을 대칭적으로 변화시키며 구한 SP 주파수와 양 단면에서 출력 파워의 변조 지수를 나타낸다. 그림 6(a)에서 보면 최대 SP 주파수는 약 3.79 THz 이다. 이는 앞의 그림 4와 5의 경우에 비하여 발생 가능한 최대 SP 주파수가 매우 큼을 알 수 있다. 그 이유는 두 DFB 영역의 브래그 파장을 대칭적으로 변화시켜서 $\triangle\lambda_B$ 증가에 따른 두 DFB 영역의 발진 모드가 받는 이득의 감소가 비슷하게 발생하여 두 DFB 영역의 모드가 발진 가능한 $\triangle\lambda_B$의 영역이 넓어져 높은 SP 주파수 발생이 가능하기 때문이다.

그림 6 (b)에서 보면 $\triangle\lambda_B$가 증가할 때 두 DFB 영역에서 발진하는 모드가 가지는 이득이 비슷하게 감소하여 두 발진 모드의 파워의 크기가 비슷하여 변조지수는 $\triangle\lambda_B$에 관계없이 거의 1임을 볼 수 있다. 그러나 $\triangle\lambda_B$가 20 nm 이상부터 양 단면 변조지수가 작아지는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 그림 3 (e)에서 보면 두 DFB 영역의 발진 파장 중심에 λ_P를 위치시키고 $\triangle\lambda_B$를 증가시키면 두 DFB 영역의 발진 모드의 이득이 같아야 하나 DFB 영역 2의 발진 모드가 가 커질수록 SHB 효과로 인하여 발진 모드의 파장이 단파장 쪽으로 이동하여 DFB 영역 1의 발진 모드보다 더 큰 이득을 받기 때문에 두 DFB 영역의 발진 모드의 파워 크기의 차이가 커지기 때문이다. $\triangle\lambda_B < \triangle$ 인 영역에서는 +1 모드가 DFB 영역 2의 금지 대역 내에 존재하여 DFB 영역 2로의 진행이 작게

표 2. 6 가지 경우에서 발생 가능한 최대 SP 주파수와 변조지수 특성

경 우	발생 가능한 최대 SP 주파수	변조지수 특성
그림 3 (a)	1.36 THz	$\triangle\lambda_B$ 증가에 따라 급격히 감소
그림 3 (b)	1.24 THz	$\triangle\lambda_B$ 증가에 따라 급격히 감소
그림 3 (c)	1.32 THz	$\triangle\lambda_B$ 증가에 따라 급격히 감소
그림 3 (d)	1.45 THz	$\triangle\lambda_B$ 증가에 따라 급격히 감소
그림 3 (e)	3.79 THz	$\triangle\lambda_B$ 가 20nm 이상부터 감소
그림 3 (f)	4.06 THz	$\triangle\lambda_B$ 증가에 관계없이 1로 일정

발생하여 오른쪽 단면의 +1 모드의 출력 파워가 작아서 오른쪽 단면에서 변조지수가 작음을 볼 수 있다.

그림 6 (c)와 (d)는 각각 두 DFB 영역의 브래그 파장 중심에 λ_P를 위치시키고 두 DFB 영역의 브래그 파장을 대칭적으로 변화시키며 구한 SP 주파수와 양 단면에서 출력 파워의 변조 지수를 나타낸다. 그림 6 (c)에서 보면 최대 SP 주파수는 약 4.06 THz 로서 그림 6 (a)에 비하여 더 큼을 알 수 있다. 그림 6 (d)는 그림 6 (b)와 다르게 $\triangle\lambda_B$가 20 nm 이상인 경우에도 변조지수가 거의 1에 가까움을 볼 수 있다. 그 이유는 다음과 같다고 생각된다. 그림 3 (f)는 두 DFB 영역의 브래그 파장 중심에 λ_P가 위치하기 때문에 그림 3 (e) 와는 달리 DFB 영역 1의 발진 모드인 +1 모드가 DFB 영역 2의 발진 모드인 +2 모드 보다 λ_P에 더 가깝게 위치하기 때문에 더 큰 이득을 받는다. $\triangle\lambda_B$가 증가하면 SHB 효과에 의하여 앞에서 설명한 것처럼 DFB 영역 2의 발진 모드는 단파장 쪽으로 이동하지만 DFB 영역 1의 발진 모드는 단파장 쪽으로 이동하지 못하고 장파장 모드가 계속 발생한다. 따라서 SHB 효과가 발생하지 않을 때 보다 DFB 영역 2의 발진 모드의 이득이 증가하여 DFB 영역 1의 발진 모드와 비슷한 크기의 이득을 받기 때문이라 생각된다. 또한 그림 3 (f)인 경우가 그림 3 (e)인 경우에 비하여 DFB 영역 1의 발진 모드가 λ_P에 더 가깝게 위치하기 때문에 더 큰 $\triangle\lambda_B$에서 안정된 SP 동작이 가능하여 발생 가능한 최대 SP 주파수가 크다고 생각된다.

앞의 6가지 경우에 대하여 발생 가능한 SP 주파수와 $\triangle\lambda_B$에 따른 변조지수 특성을 표 2에 정리하였다. 두 DFB 영역의 브래그 파장 중심에 λ_P를 위치시킨 그림 3 (f) 경우가 두 DFB 영역의 발진 파장 중심에 λ_P를 위치시킨 그림 3 (e) 경우 보다 최대 SP 주파수가 높고 변조지수 특성이 좋은 이유를 그림 7을 통하여 설명하고자 한다.

그림 7 (a)와 (b) {(c)와 (d)}는 각각 두 DFB 영역의 발진 파장 {브래그 파장} 중심에 λ_P를 위치시키고 두 DFB 영역의 브래그 파장을 대칭적으로 변화시키며 구한 여러 개의 $\triangle\lambda_B$에 따른 반사 스펙트럼과 $\triangle\lambda_B$에 따른 발진 파장을 나타낸다. 반사 스펙트럼은 각각의 DFB 영역의 평균 캐리어 밀도를 구하여 계산하였다. 그림 7 (b)와 (d)에서 전산 모의를 통하여 구한 $\triangle\lambda_B$에 따른 발진모드의 파장은 점으로 나타내었다. 편의상 선으로 나타낸 $\triangle\lambda_B$에 따른 DFB 영역 1과 2의 장파장 모드와 단파장 모드의 파장은 다음과 같이 구하였다. $\triangle\lambda_B = 0$ 일 때 전산 모의를 통하여 구한 DFB 영역 1과 2의 장파장 모드의 파장과 이렇게 구한 장파장 모드의 파장에서 금지대역 폭에 해당하는 파장을 뺀 파장을 단파장 모드의 파장으로 정하였다. 이렇게 구한 $\triangle\lambda_B = 0$ 일 때의 파장들에 대응되는 $\triangle\lambda_B$를 더하여 구한 파장들을 각각 $\triangle\lambda_B$에 따른 DFB 영역 1과 2의 장파장 모드와 단파장 모드의 파장이라고 결정하였다.

그림 3 (e)와 (f)에서 볼 수 있듯이 이득 스펙트럼으로부터 DFB 영역 2의 장파장 모드는 단파장 모드보다 작은 이득을 얻게 된다. $\triangle\lambda_B$가 증가할수록 발진 모드가 받는 이득이 작아져 캐리어 밀도가 증가하여 SHB 효과가 커져 그림 7 (b)와 (d)에서 보듯이 DFB 영역 2의 발진모드의 파장이 장파장 쪽에서 단파장 쪽으로 자연스럽게 이동하는 것을 볼 수 있다. 반면에 이득 스펙트럼으로부터 DFB 영역 1의 장파장 모드는 단파장 모드보다 큰 이득을 얻게 된다. 따라서 $\triangle\lambda_B$가 증가하여도 DFB 영역 1의 경우는 발진 모드의 파장이 단파장 쪽으로 이동하지 못하고 장파장 만이 발생함을 볼 수 있다. 그림 7 (c)와 (d)의 경우 (그림 3 (f) 경우)가 그림 7 (a)와 (b)의 경우(그림 3 (e) 경우)보다 금지대역 폭의 반만큼 더 큰 $\triangle\lambda_B$에서 DFB 영역 1의 모드가 안정되게 발진하므로 그림 7 (c)와 (d)의 경우가 그림 7 (a)와 (b)의 경우보다 더 큰 최대 SP 주파수를 얻을 수 있었다. 또한 $\triangle\lambda_B$가 증가함에 따라 SHB 효과가 증가하여 DFB 영역 2의 발진 모드는 장파장 쪽에서 단파장 쪽으로 자연스럽게 이동하여 그림 7 (c)와 (a)를 비교하면 두 발진 모드의 파워 차이가 그림 7(c)가 그림 7(a)보다 작아 $\triangle\lambda_B$에 따른 변조지수 특성도 더 우수함을 볼 수 있었다.

V. 결 론

본 논문에서는 이득 분산이 다중 영역 복소 결합 DFB 레이저에서 발진하는 두 모드의 비팅에 의한 self-pulsation (SP) 특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 두 DFB 영역의 발진 모드의 파장 또는 브래그 파장이 이득 스펙트럼의 이득이 최대가 되는 파장과 가지는 6 가지 경우에 대하여 두

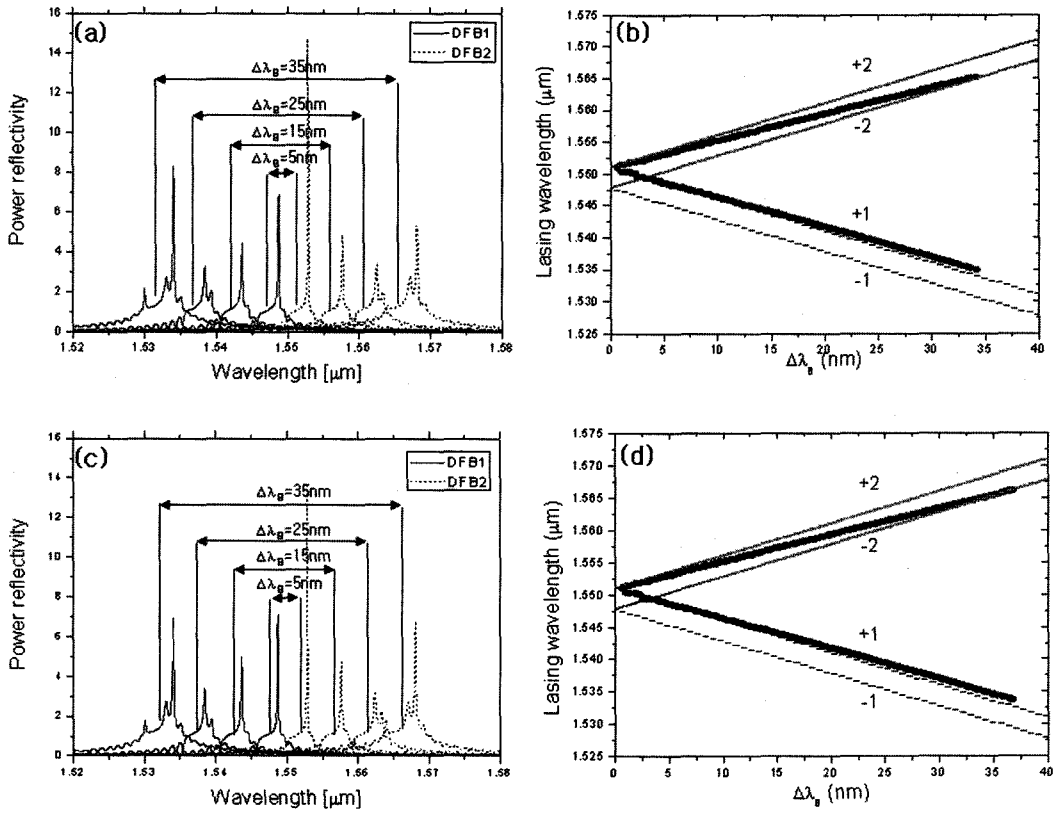

그림 7. 두 DFB 영역의 발진 파장 중심에 λ_P를 위치시킨 경우 (a) 여러 개의 $\triangle\lambda_B$에서 구한 반사 스펙트럼, (b) $\triangle\lambda_B$에 따른 발진 파장. 두 DFB 영역의 브래그 파장 중심에 λ_P를 위치시킨 경우 (c) 여러 개의 $\triangle\lambda_B$에서 구한 반사 스펙트럼, (d) $\triangle\lambda_B$에 따른 발진 파장.

DFB 영역의 브래그 파장 차이, $\triangle\lambda_B$,에 따른 SP 주파수와 출력 파워의 변조지수를 구하였다.

두 DFB 영역의 발진 모드의 파장 중심 또는 브래그 파장 중심에 λ_P를 위치시킨 경우가 특정 DFB 영역의 발진 모드의 파장 또는 브래그 파장에 λ_P를 위치시킨 경우에 비하여 두 DFB 영역의 $\triangle\lambda_B$ 증가에 따른 발진 모드가 받는 이득의 감소가 작아 발생 가능한 최대 SP 주파수가 크고 또한 두 DFB 영역 발진 모드의 파워가 비슷하여 $\triangle\lambda_B$에 따른 변조지수의 특성도 좋음을 볼 수 있었다.

두 DFB 영역의 브래그 파장 중심에 λ_P를 위치시키는 경우가 발진 모드의 파장 중심에 λ_P를 위치시키는 경우에 비하여 $\triangle\lambda_B$를 증가시킬 때 금지대역 폭의 반만큼 더 큰 $\triangle\lambda_B$에서 DFB 영역 1의 모드가 안정되게 발진하므로 더 큰 최대 SP 주파수를 얻을 수 있었다. 또한 $\triangle\lambda_B$가 증가함에 따라 SHB 효과가 증가하여 DFB 영역 2의 발진 모드는 장파장 쪽에서 단파장 쪽으로 자연스럽게 이동하여 두 DFB 영역의 브래그 파장 중심에 λ_P를 위치시키는 경우가 발진 모드의 파장 중심에 λ_P를 위치시키는 경우에 비하여 DFB 영역 1의 발진 모드의 파워와 DFB 영역 2의 발진 모드의 파워 차이가 적어 $\triangle\lambda_B$에 따른 변조지수 특성도 더 우수함을 볼 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2006년 정부의 재원으로 한국학술진흥재단(KRF-2006-331-D00712), 한국과학재단(R01-2006-000-11342-0)의 지원과 숭실대학교 교내 연구비의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

참고문헌

[1] 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.

[2] 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.

[3] R.-P. Braun, G. Grosskopf, H. Heidrich, C. V. Helmolt, R. Kaiser, K. Kruger, U. Kruger, D. Rohde, F. Schmidt, R. Stenzel, and D. Trommer, "Optical microwave generation and transmission experiments in the 12- and 60-GHz

region for wireless communications," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 46, no. 4, pp. 320-330, 1998.
[4] 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.
[5] I. S. Gregory, W. R. Tribe, B. E. Cole, C. Baker, M. J. Evans, I. V. Bradley, E. H. Linfield, A. G. Davies and M. Missous, "Phase sensitive continuous wave THz imaging using diode lasers," *Electronics Letters.*, vol. 40, no. 2, 2004.
[6] Masahiko Tani, Ping Gu, Masaharu Hyodo, Kiyomi Sakai and Takehiko Hidaka, "Generation of Coherent terahertz radiation by photomixing of dual-mode lasers," *Optical and Quantum Electronics.*, vol. 32, pp. 503-520, 2000.
[7] S. Iio, M. Suehiro, T. Hirata, T. Hidaka "Two-Longitudinal -Mode Laser Diodes," *IEEE Photonics Technology Letters.*, vol. 7, no. 9, 1995
[8] 김부균, 김태영, 김상택, 김선호, 박경현, "매우 넓은 영역의 Self-Pulsation 주파수와 높은 변조지수를 가지는 다중 영역 복소 결합 DFB 레이저," *한국광학회지*, vol. 17, no. 2, pp. 191-197, 2006.
[9] J. Carroll, J. Whiteaway, and D. Plumb, *Distributed feedback semiconductor lasers*, London: SPIE optical engineering press, 1998.
[10] 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.
[11] Narottam Kumar, Yasuhiro Yamayoshi, and Hitoshi Kawaguchi, "Analysis of Basic Four-Wave Mixing Characteristics in a Semiconductor Optical Amplifier by the Finite-Difference Beam Propagation Method," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 36, no. 10, pp. 1184-1192, 2000.

Effect of Gain Dispersion on the Characteristics of Self-Pulsation in a Multisection Complex-Coupled DFB Laser

Tae-Young Kim and Boo-Gyoun Kim†

School of Electronic Engineering, Soongsil University, Seoul 156-743, KOREA

† *E-mail: bgkim@e.ssu.ac.kr*

(Received October 13, 2006, Revised manuscript January 9, 2007)

The effect of gain dispersion on the self-pulsation (SP) characteristics due to the mode beating of two modes emitted in a multisection DFB laser composed of two complex-coupled DFB sections and a phase control section is investigated. When the peak wavelength, λ_P, of the gain spectrum of the DFB section is positioned in the center of the lasing wavelengths or the Bragg wavelengths of the two DFB sections, the maximum SP frequencies are higher and the modulation index has better characteristics compared to those cases for λ_P fixed at the lasing wavelength or Bragg wavelength of one DFB section, when the difference between the Bragg wavelengths of the two DFB sections, $\triangle\lambda_B$, is varied. When λ_P is positioned in the center of the Bragg wavelengths of the two DFB sections, the maximum SP frequency is higher and of the modulation index has better characteristics compared to those of the case for λ_P positioned in the center of the lasing wavelengths of the two DFB sections.

OCIS code : 140.3490, 140.5960, 140.2020.