

매우 넓은 영역의 Self-Pulsation 주파수와 높은 변조 지수를 가지는 다중 영역 복소 결합 DFB 레이저

김부균[†] · 김태영 · 김상택

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

김선호

한국과학기술연구원 광기술 연구 센터
Ⓣ 136-791 서울시 성북구 하월곡동 39-1번지

박경현

한국전자통신연구원 기반기술연구소 광소자연구부
Ⓣ 305-700 대전시 유성구 가정동 161번지

(2006년 3월 3일 받음, 2006년 4월 17일 수정본 받음)

두 개의 DFB 영역과 위상 조정 영역으로 구성된 다중 영역 복소 결합 DFB 레이저에서 방출되는 두 모드의 비팅에 의해서 발생하는 Self-Pulsation(SP) 동작 특성을 전산 모의 하였다. SP 주파수는 두 DFB 영역에서 발진하는 모드의 파장 차이에 의해 결정되며, 각각의 DFB 영역의 발진 모드의 파장은 회절격자 주기의 변화에 의해 달라진다. 두 DFB 영역의 회절격자의 주기 차이를 변화시킴으로써 다중 영역 DFB 레이저에서 발생하는 SP 주파수를 매우 낮은 주파수에서 THz 영역까지 변화시킬 수 있었다. 또한 발진 모드가 다른 DFB 영역의 금지대역에 놓이지 않는 경우 발진되는 모드는 다른 DFB 영역으로 큰 반사 없이 진행하여 두 모드들 사이의 상호작용이 크게 발생하여 index-coupled 회절격자를 가지는 다중 영역 DFB 레이저와는 달리 변조 지수가 매우 큰 출력을 얻을 수 있었다.

주제어 : Pulsation DFB lasers, Multi-section DFB lasers, Optical generation of millimeter waves, Terahertz wave generation, Photomixing methods.

I 서 론

두 개의 DFB 영역과 위상 조정 영역이 집적된 다중 영역 DFB 레이저에서 두 DFB 영역에 문턱 전류 이상의 전류가 주입되면 각각의 DFB 영역에서 발진하는 두 모드의 비팅 현상으로 self-pulsation(SP) 동작을 하게 된다.^[1] SP 주파수는 각각의 DFB 영역에서 발진하는 모드의 파장 차이에 해당하는 주파수이다. 따라서 안정된 SP 동작 특성을 얻기 위해서는 각각의 DFB 영역의 발진 모드가 안정된 특성을 가져야 한다. 이러한 SP 출력은 완전 광 네트워크 구현을 위하여 필요한 광 신호 복구와 초고속 광 신호 처리를 위한 핵심소자로 사용하기 위하여 많은 연구가 진행되고 있다.^[2-5]

주파수가 100 GHz ~ 10 THz 영역에 존재하는 테라헤르츠 (THz)파는 100 GHz 이하의 주파수를 가지는 마이크로파 영역과 10 THz 이상의 주파수를 가지는 적외선 영역과 비교하면, 테라헤르츠 파 생성 및 검출에 사용되는 소자 및 시스템 개발의 어려움 때문에 최근까지 테라헤르츠 파 기술의 개발과 이를 이용한 응용이 늦어지고 있다.^[6] 전파 천문학 관측과 유기 분자들을 검출하는 분광학 응용에 테라헤르츠 파 측정

기술은 매우 중요하다. 또한 테라헤르츠 파를 이용한 영상 시스템은 생체 내 의학적 이미징 작업과 보안 검사에 사용될 수 있다.^[7] 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 생성하기 위하여 서로 다른 파장을 가지는 두 개의 레이저 빔을 캐리어의 수명 시간이 매우 짧은 광전도 재료나 uni-travelling-carrier-photodiode(UTC-PD)에 공간적으로 결합시켜 두 레이저 빔의 파장 차이에 해당하는 테라헤르츠 파를 생성시키는 photomixing 방법이 연구되어지고 있다. Photomixing 방법에 의해 생성되는 테라헤르츠 파의 특성은, 테라헤르츠 파가 파장이 다른 두 레이저 빔의 간섭에 의하여 발생되므로, 두 레이저 빔의 특성에 의해 결정된다.^[8] 따라서 두개의 모드를 방출하는 레이저를 monolithic 하게 구현하는 연구가 진행되고 있다.^[9]

Index-coupled(IC) DFB 구조를 사용하는 다중영역 DFB 레이저의 경우 안정된 SP 동작을 하는 두 모드의 파장 차이는 DFB 영역의 금지대역폭에 의하여 제한을 받는다. 또한 각각의 DFB 영역에서 발진하는 모드의 파장은 다른 DFB 영역의 금지대역 내에 존재하기 때문에 다른 DFB 영역으로 진행

[†] E-mail: bgkim@e.ssu.ac.kr

하는 필드의 크기가 작다. 따라서 양 단면에서 출력 파워의 변조 지수는 0.2-0.4 사이로 작다.^[10] 반면에 complex-coupled (CC) 회절격자를 가지는 DFB 영역에서 발진되는 모드의 특성은 외부 반사와 회절격자 단면 위상등과 같은 외부 조건의 영향을 거의 받지 않고 CC 회절격자의 특성에 의하여 결정된다.^[11] 따라서 CC DFB 구조를 사용하는 다중 영역 DFB 레이저의 경우 DFB 영역의 금지대역폭과 두 DFB 영역의 반사 스펙트럼의 중첩 여부와 관계없이 각각의 DFB 영역에서 자체 CC 회절격자 특성에 의해서 결정되는 안정된 모드가 발진한다. 따라서 두 DFB 영역의 회절격자의 주기 차이에 의하여 두 모드의 파장 차이가 결정되리라 예상된다. 또한 반도체 매질의 이득 대역폭이 매우 넓으므로 CC 회절격자의 주기 차이를 조정함으로써 다중 영역 DFB 레이저에서 발진하는 두 모드의 주파수 차이를 THz 영역까지 넓힐 수 있으리라 예상된다.

또한 다른 DFB 영역의 회절격자 특성과는 상관없이 자기 영역에 존재하는 CC 회절격자의 특성에 의하여 발진 모드가 결정되므로 발진되는 두 모드는 다른 영역으로 큰 반사가 없이 진행하여 모드들 사이의 상호작용이 크게 발생하여 두 발진 모드의 크기가 거의 비슷한 값을 가져 변조지수가 큰 출력을 얻을 수 있으리라 예상된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 다중 영역 DFB 레이저의 동적 특성 해석을 위한 시간 영역 모델에 대하여 살펴보고 3장에서는 파장 차이가 매우 넓은 영역을 가지는 두 모드를 방출하는 다중 영역 복소 결합 DFB 레이저의 동작 원리에 대하여 살펴본다. 4장에서 매우 낮은 주파수에서 테라헤르츠 파 영역까지의 주파수 차이를 가지는 두 모드를 방출하는 다중 영역 복소 결합 DFB 레이저의 동작 특성에 관한 전산 모의 결과를 제시한다. 마지막으로 5장에서는 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 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.^[12]

$$\frac{1}{v_g} \frac{\partial a(z,t)}{\partial t} + \frac{\partial a(z,t)}{\partial z} = (g - \alpha - j\delta)a(z,t) - j\kappa_{ab}b(z,t) + F_a(z,t)$$

$$\frac{1}{v_g} \frac{\partial b(z,t)}{\partial t} - \frac{\partial b(z,t)}{\partial z} = (g - \alpha - j\delta)b(z,t) - j\kappa_{ba}a(z,t) + F_b(z,t) \quad (1)$$

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

여기서 $a(z,t)$ 와 $b(z,t)$ 는 각각 순방향과 역방향으로 진행하

는 정규화된 slowly-varying 필드의 크기, v_g 는 군속도, g 는 이득 계수, α 는 손실 계수, δ 는 레이저의 발진 파장이 브래그 파장으로부터 얼마나 벗어나 있는지를 나타내는 인자이다. $\kappa_{ab}(\kappa_{ba})$ 는 역방향(순방향) 필드가 순방향(역방향) 필드와 결합하는 정도를 나타내는 결합 계수이다. 복소 결합인 경우 $\kappa_{ab} = \kappa_i + j\kappa_g e^{-j\theta}$ 와 $\kappa_{ba} = \kappa_i + j\kappa_g e^{j\theta}$ 이다. 여기서 θ 는 인텍스 회절격자와 이득 회절격자의 위상 차이이다. θ 가 0이면 in-phase(IP) 회절격자이고 θ 가 π 이면 anti-phase(AP) 회절격자로 이 두 경우 $\kappa_{ab} = \kappa_{ba}$ 이다. $F_a(z,t)$ 와 $F_b(z,t)$ 는 자발 방출 잡음으로 레이저 발진시에 구동 원으로 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 은 비선형 이득 억제 계수이고 $S(z,t)$ 는 광자 밀도이다.

반도체 매질에서 이득은 캐리어 밀도뿐만 아니라 파장에 따라 변화한다. 이러한 파장에 따른 이득 변화는 Lorentzian 함수로 근사할 수 있고 그 수식은 다음과 같다.^[12]

$$g(\omega, N) = \frac{\Gamma g_N (N - N_0)}{2(1 + \epsilon S)} \frac{1}{1 + j\tau(\omega - \omega_p)} \quad (3)$$

여기서 Γ 는 도파로 구속 인자, τ 는 이득 스펙트럼의 대역폭을 결정하는 상수, ω_p 는 최대 이득을 갖는 각 주파수이고 캐리어 밀도에 따른 변화는 다음 수식과 같이 표현된다.

$$\omega_p(N) = \omega_{p0} + \frac{\partial \omega_p}{\partial N} (N - N_0) \quad (4)$$

여기서 ω_{p0} 는 캐리어 밀도 N 이 투명 캐리어 밀도 N_0 일 때 최대 이득을 갖는 각 주파수이다. 전산모의 수행 시 이러한 캐리어 밀도뿐만 아니라 파장에 따라 변화하는 이득 분산을 고려하기 위하여 디지털 필터 기법을 사용하였다.^[12]

시간 영역과 공간 영역에서 결합 방정식과 비율 방정식의 수치 계산의 효율성과 정확성을 위해 연산자 분리 시 영역 모델^[13] 사용하였다. 시간 영역 모델을 사용하여 구한 결과로부터 출력 파워, 광 스펙트럼 및 RF 스펙트럼과 변조 지수 등을 구하였다.

III. 파장 차이가 매우 넓은 영역을 가지는 두 모드를 방출하는 다중 영역 복소 결합 DFB 레이저의 동작 원리

그림 1은 두 개의 DFB 영역과 위상 조정 영역으로 구성된 다중 영역 DFB 레이저의 개념도를 나타낸다. 각각의 DFB 영역에 문턱 전류 이상의 전류가 주입되면 각각의 DFB 영역에 발진 모드가 존재한다. 이러한 두 모드를 방출하는 소자의 동작 특성은 각각의 DFB 영역에서 발진하는 모드의 특성 및 위상 조정 영역의 위상에 의해 결정된다.

그림 2는 문턱 전류 이상에서 IP 회절격자를 가지는 두 CC

DFB 영역의 반사 스펙트럼을 나타낸다. 여기서 DFB 영역 2의 격자 주기를 DFB 영역 1의 격자 주기보다 크도록 설정하면 DFB 영역 2의 브래그 파장이 DFB 영역 1의 브래그 파장보다 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. IP 회절격자를 가지는 CC DFB 영역에서는 장파장 모드인 +1 모드와 +2 모드가 발진한다. 따라서 IC DFB 구조를 사용한 경우와는 다르게 $\Delta\lambda_B < \Delta$ 인 경우나 $\Delta\lambda_B > \Delta$ 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 발생하는 호핑으로 인한 두 모드의 파장 차이의 급격한 변화도 발생하지 않으리라 예상된다. CC DFB 구조를 사용하는 다중 영역 DFB 레이저의 경우 +1 모드와 +2 모드의 모드 비팅에 의하여 발생하는 SP 주파수는 다음 수식과 같이 근사적으로 표현할 수 있다.

$$f = \frac{c}{\lambda_0^2} \Delta\lambda_B \quad (5)$$

여기서 λ_0 는 기준 파장으로 $1.55 \mu\text{m}$ 이고 c 는 빛의 속도이다. 따라서 두 DFB 영역의 브래그 파장 차이 $\Delta\lambda_B$ 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 광 대역 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 변조 지수가 커야 한다. 모드 비팅에 의한 SP 신호의 크기는 각각의 DFB 영역에서 발진하는 모드가 다른 DFB 영역으로 진행하여 발생하는 두 모드의 상호 작용에 의해 결정된다. 따라서 양 단면에서 출력 파워는 각각의 DFB 영역에서 두 모드의 상호 작용에 의한 것으로 다음 수식과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_L(t) &= C|b_1(0)e^{j\omega t} + b_2(0)e^{j\omega t}|^2 \\ &= C|b_1(0)|^2 + C|b_2(0)|^2 + 2C|b_1(0)b_2(0)|\cos(\Delta\omega t + \Delta\phi_b) \\ P_R(t) &= C|a_1(L)e^{j\omega t} + a_2(L)e^{j\omega t}|^2 \\ &= C|a_1(L)|^2 + C|a_2(L)|^2 + 2C|a_1(L)a_2(L)|\cos(\Delta\omega t + \Delta\phi_a) \\ \Delta\phi_b &= \angle b_1(0) - \angle b_2(0), \quad \Delta\phi_a = \angle a_1(L) - \angle a_2(L) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 $P_L(t)$ 와 $P_R(t)$ 는 각각 왼쪽 단면과 오른쪽 단면에서 시간에 따른 출력 파워를 나타내고, C 는 파워 변환 상수로 A/Γ 이고, $b_1(0)$ 와 $b_2(0)$ 는 각각 왼쪽 단면에서 DFB 영역 1에서 발진하는 모드와 DFB 영역 2에서 발진하는 모드의 정규화된 역방향 필드의 크기를 나타내고, $a_1(L)$ 과 $a_2(L)$ 은 각각

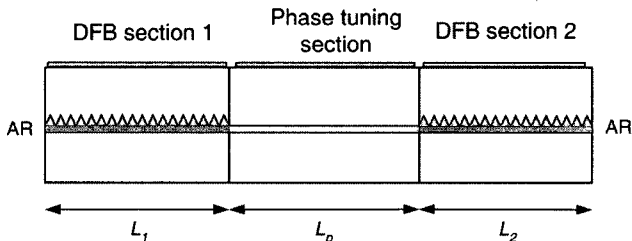
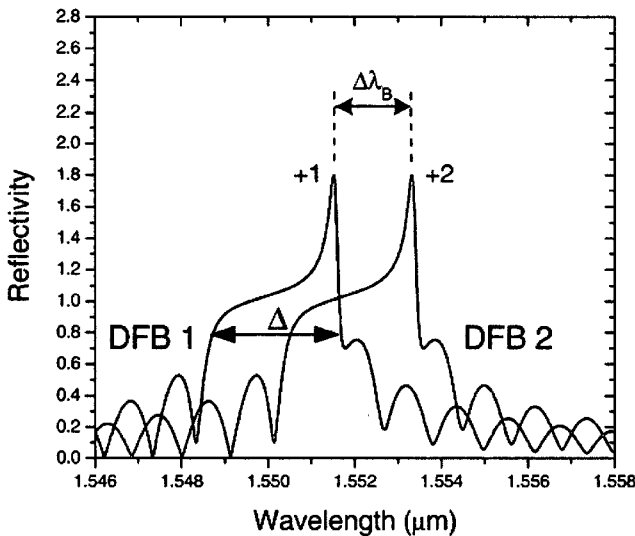
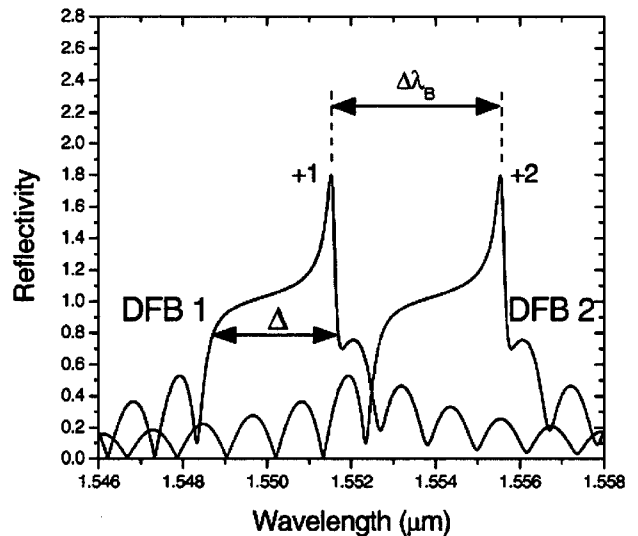


그림 1. 두 개의 DFB 영역과 위상 조정 영역으로 구성되는 다중 영역 DFB 레이저의 개념도.



(a) 반사 스펙트럼의 금지 대역폭이 서로 중첩되어 있는 경우 ($\Delta\lambda_B < \Delta$)



(b) 반사 스펙트럼의 금지 대역폭이 서로 중첩되지 않는 경우 ($\Delta\lambda_B > \Delta$)

그림 2. 문턱 전류 이상에서 IP 회절격자를 가지는 두 CC DFB 영역의 반사 스펙트럼.

오른쪽 단면에서 DFB 영역 1에서 발진하는 모드와 DFB 영역 2에서 발진하는 모드의 정규화된 순방향 필드의 크기를 나타낸다. 그리고 $\Delta\omega$ 는 두 모드의 각주파수 차이를 나타낸다. 따라서 각 단면에서의 출력 파워에 대한 변조 지수는 다음 수식과 같이 표현된다.

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

$$m_R = \frac{P_{R,Max} - P_{R,Min}}{P_{R,Max} + P_{R,Min}} = \frac{2|a_1(L)a_2(L)|}{|a_1(L)|^2 + |a_2(L)|^2} \quad (7)$$

여기서 $P_{L(R),Max}$ 와 $P_{L(R),Min}$ 은 각각 왼쪽(오른쪽) 단면에서 출력 파워의 최대값과 최소값을 나타낸다. 따라서 양 단면에서 출력 파워에 대한 변조 지수를 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.

CC DFB 구조를 사용한 경우 두 DFB 영역의 반사 스펙트럼의 금지대역이 서로 중첩되어 있을 때(그림 2(a)) DFB 영역 1에서 발진하는 +1 모드는 DFB 영역 2의 금지대역 내에 존재하게 된다. 따라서 DFB 영역 1에서 발진하는 +1 모드는 DFB 영역 2로 진행이 작게 발생하여, 오른쪽 단면에서 출력 파워에 대한 변조 지수가 작게 된다. 반면에 DFB 영역 2에서 발진하는 +2 모드는 DFB 영역 1의 금지대역 바깥에 존재한다. 이 경우 DFB 영역 2에서 발진하는 +2 모드는 DFB 영역 1로 진행이 많이 발생하여, 왼쪽 단면에서 출력 파워에 대한 변조 지수가 크게 된다. 두 DFB 영역의 반사 스펙트럼의 금지대역이 서로 중첩되지 않은 경우(그림 2(b)) +1 모드와 +2 모드는 다른 DFB 영역으로 진행이 많이 발생하여 양 단면에서 출력 파워의 변조 지수가 크게 된다. 즉 CC DFB 구조를 사용하는 경우 각각의 DFB 영역에서 안정된 발진 모드가 존재하여 금지대역폭의 제한을 받지 않아 매우 넓은 영역의 파장 차이를 가지는 안정된 두 모드의 방출 동작이 예상된다. 또한 IC DFB 구조를 사용하는 경우에 비하여 양 단면에서 출력 파워에 대한 변조 지수가 크리라 예상된다.

IV. 다중 영역 복소 결합 DFB 레이저에서 방출되는 Self-Pulsation 동작 특성 전산 모의 결과

그림 3은 DFB 영역의 이득 스펙트럼과 IP 회절격자와 AP 회절격자를 가지는 다중 영역 DFB 레이저의 각각의 DFB 영역의 반사 스펙트럼을 나타낸다. 이득 스펙트럼은 문턱전류에서 FWHM(full width half maximum)이 5 THz인 Lorentzian 함수로 근사하였다. 또한 두 DFB 영역의 발진 모드의 파장 중심에 이득 스펙트럼에서 최대 이득을 가지는 파장 (λ_p)을 위치시켜 두 DFB 영역의 발진 모드가 동일한 이득 계수를 가지도록 하였다.

그림 1과 같은 CC 다중 영역 DFB 레이저의 특성을 전산 모의하기 위하여 구조 파라미터를 다음과 같이 설정하였다.

두 DFB 영역의 결합 세기의 크기는 3이고 CR(coupling ratio), κ_g/κ_i 는 0.2이다. 또한 각 DFB 영역과 위상 조정 영역의 길이는 300 μm 로, 위상 조정 영역의 위상은 0으로 설정하였고 양 단면은 무반사 코팅 되었다고 가정하였다. 그리고 DFB 영역의 주입 전류는 주어진 결합 세기에서의 문턱 전류보다 30 mA 큰 전류이다. 전산 모의에 사용한 나머지 파라미터 값은 표 1과 같다. 각각의 DFB 영역에서 발진하는 파장이 다른 두 모드의 비팅에 의해서 안정된 SP 동작이 발생하기 위해서는 다음과 같은 조건을 만족하여야 하고 다음 조건을 모두 만족하는 경우에 대하여 안정된 두 모드 방출에 의해 SP 동작이 발생하였다고 결정하였다.

1. 출력 파형의 SP 주파수가 두 DFB 영역에서 발진하는 모드의 파장 차이로 주어지는 주파수와 일치하여야 한다.
2. SP 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 4는 두 DFB 영역의 회절격자가 IP CC 구조를 가지는 경우로서 두 회절격자의 브래그 파장 차이, $\Delta\lambda_B$ 에 따른 두 모드의 비팅에 의한 SP 주파수, 두 DFB 영역의 발진 모드 파장, 오른쪽 단면에서의 평균 출력 파워와 +1 모드와 +2 모드의 출력 파워, 오른쪽 단면에서 출력 파워의 변조 지수, 왼쪽 단면에서의 평균 출력 파워와 +1 모드와 +2 모드의 출력 파워, 그리고 왼쪽 단면에서 출력 파워의 변조 지수를 나타낸다. 그림 4(a)는 $\Delta\lambda_B$ 에 따른 두 모드의 비팅에 의한 SP 주파수로 매우 낮은 주파수에서 약 3 THz 까지 발생함을 볼 수 있다. 그림 4(b)는 λ_p 를 1.55 μm 로 고정한 다음 DFB 영역 1의 브래그 파장은 감소시키고 DFB 영역 2의 브래그 파장은 증가시켜 가며 계산한 두 DFB 영역의 발진 파장을 나타낸다. $\Delta\lambda_B$ 가 증가함에 따라 DFB 영역 1의 +1 모드의 파장은 감소하였고 DFB 영역 2의 +2 모드의 파장은 증가하였다.

그림 4(c)는 오른쪽 단면에서 평균 출력 파워와 +1 모드와 +2 모드의 출력 파워를 나타낸다. $\Delta\lambda_B$ 의 증가에 따라 두 DFB 영역에서 발진하는 모드의 이득이 작아져 평균 출력 파워가 감소함을 알 수 있다. $\Delta\lambda_B < \Delta$ 인 영역에서는 +1 모드가 DFB 영역 2의 금지 대역 내에 존재하여 DFB 영역 2로의 진행이 작게 발생하여 오른쪽 단면에서의 +1 모드의 출력 파워의 크기가 작다. $\Delta\lambda_B > \Delta$ 인 영역에서는 $\Delta\lambda_B$ 의 증가에 따라 +1 모드와 +2 모드의 출력 파워가 비슷한 크기로 감소하는 것을 볼 수 있다. 그림 4(d)는 오른쪽 단면에서의 변조 지수를 보여준다. 그림 4(c)와 식 (7)을 통하여 알 수 있듯이 $\Delta\lambda_B < \Delta$ 인 영역에서는 DFB 영역 1의 +1 모드가 DFB 영역 2로의 진행이 작게 발생하여 변조 지수가 작고 $\Delta\lambda_B > \Delta$ 인 영역에서는 +1 모드와 +2 모드가 모두 상대 DFB 영역으로 진행이 크게 발생하므로 출력 파워에 대한 변조 지수가 매우 큼을 볼 수 있다.

그림 4(e)는 왼쪽 단면의 평균 출력 파워와 +1 모드와 +2 모드의 출력 파워를 보여준다. 그림 4(c)와는 달리 $\Delta\lambda_B$ 의 모든 영역에서 DFB 영역 2의 +2 모드가 DFB 영역 1의 금지대역 바깥에 존재하여 DFB 영역 1로 진행이 크게 발생하므로 $\Delta\lambda_B < \Delta$ 인 영역에서도 평균 출력 파워가 크다. 그림 4(f)는

왼쪽 단면의 변조 지수를 나타낸다. 그림 4(e)에서 보듯이 $\Delta\lambda_B$ 의 모든 영역에서 두 발진 모드의 크기가 비슷하여 모든 영역에서 변조 지수가 거의 1에 가까운 것을 볼 수 있다.

그림 5는 두 DFB 영역의 회절격자가 AP CC 구조를 가지는 경우로서 $\Delta\lambda_B$ 에 따른 두 모드의 비팅에 의한 SP 주파

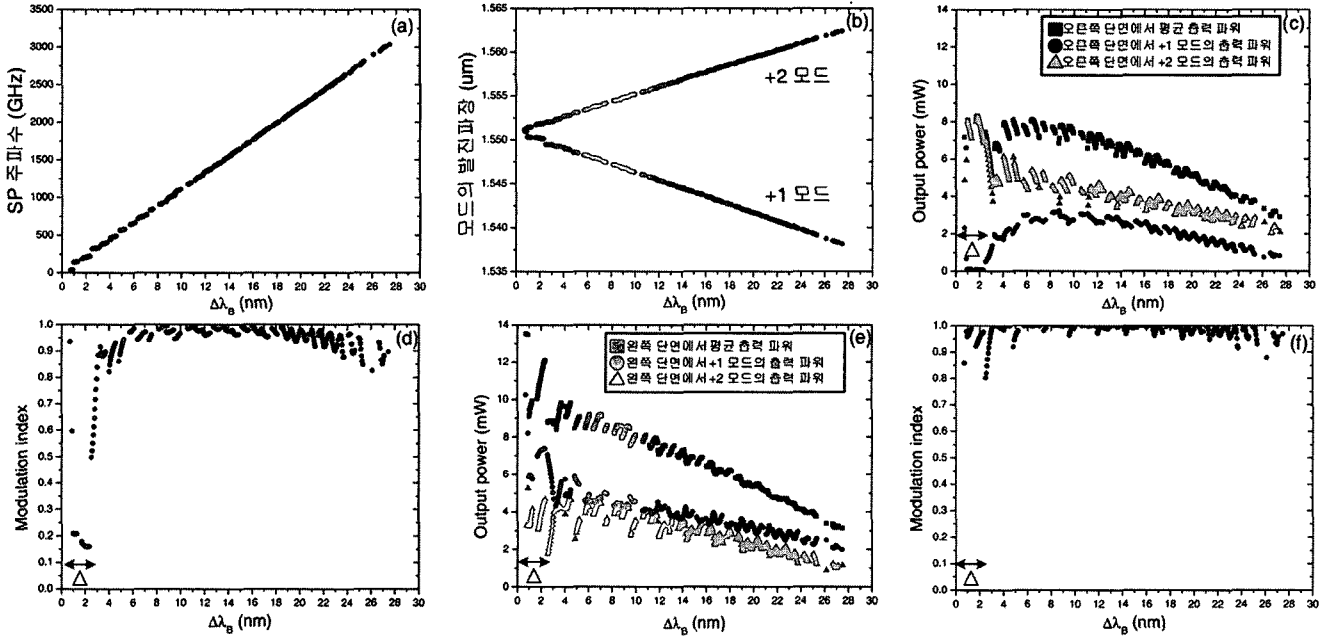


그림 4. 두 DFB 영역의 회절격자가 IP CC 구조를 가지는 경우, $\Delta\lambda_B$ 에 따른 (a) SP 주파수, (b) +1 모드와 +2 모드의 파장, (c) 오른쪽 단면에서의 평균 출력 파워와 +1 모드와 +2 모드의 출력 파워, (d) 오른쪽 단면에서 출력 파워의 변조 지수, (e) 왼쪽 단면에서의 평균 출력 파워와 +1 모드와 +2 모드의 출력 파워, (f) 왼쪽 단면에서 출력 파워의 변조 지수.

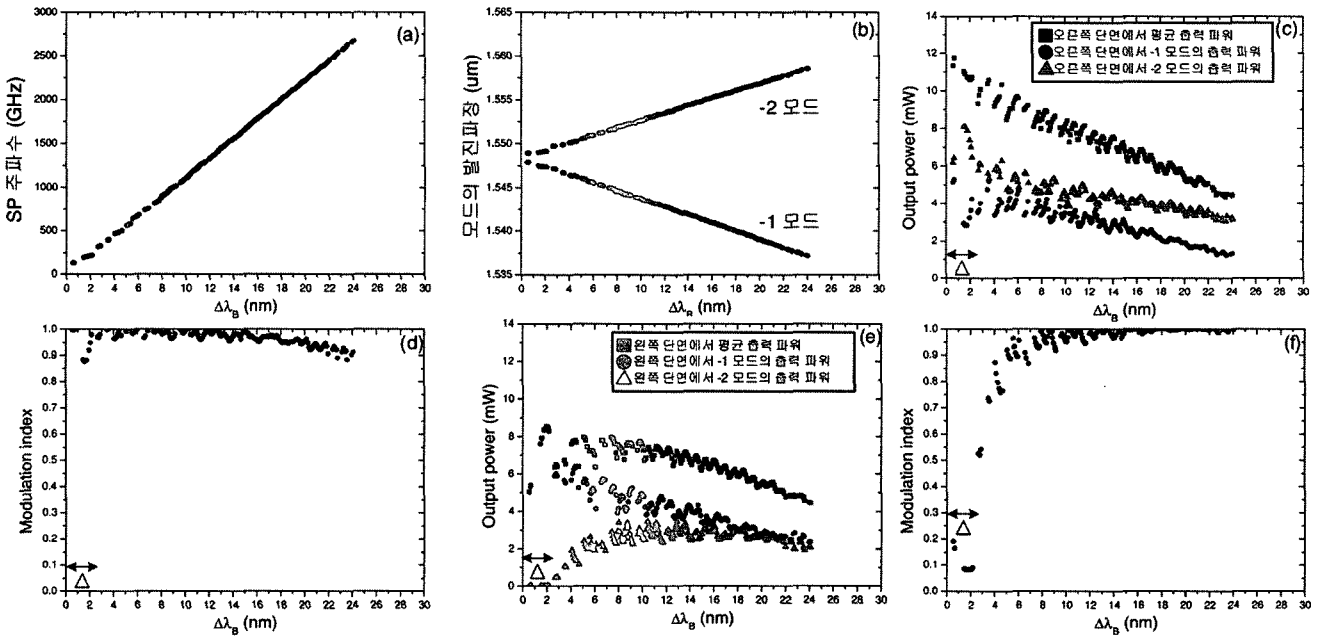


그림 5. 두 DFB 영역의 회절격자가 AP CC 구조를 가지는 경우, $\Delta\lambda_B$ 에 따른 (a) SP 주파수, (b) -1 모드와 -2 모드의 파장, (c) 오른쪽 단면에서의 평균 출력 파워와 -1 모드와 -2 모드의 출력 파워, (d) 오른쪽 단면에서 출력 파워의 변조 지수, (e) 왼쪽 단면에서의 평균 출력 파워와 -1 모드와 -2 모드의 출력 파워, (f) 왼쪽 단면에서 출력 파워의 변조 지수.

수, 두 DFB 영역의 발진 모드 파장, 오른쪽 단면에서의 평균 출력 파워와 -1 모드와 -2 모드의 출력 파워, 오른쪽 단면에서 출력 파워의 변조 지수, 왼쪽 단면에서의 평균 출력 파워와 -1 모드와 -2 모드의 출력 파워, 그리고 왼쪽 단면에서 출력 파워의 변조 지수를 나타낸다. 그림 5(a)는 $\Delta\lambda_B$ 에 따른 두 모드의 비팅에 의한 SP 주파수로 매우 낮은 주파수에서 약 2.7 THz 까지 발생함을 알 수 있었다. 두 회절격자가 IP CC 구조를 가지는 그림 4의 경우보다 발생 가능한 최대 SP 주파수가 작음을 알 수 있다. 그 이유는 AP CC DFB 구조를 가지는 경우의 동작 특성이 IP CC DFB 구조를 가지는 경우보다 불안정하기 때문이라 생각된다. 그림 5(b)는 두 DFB 영역의 발진 모드의 파장을 나타내는 것으로 각각의 AP CC DFB 영역에서 단파장 모드가 발진하기 때문에 두 DFB 영역의 회절격자의 주기가 거의 같은 영역에서는 발진하는 파장이 중심 파장 $1.55 \mu\text{m}$ 보다 작은 것을 볼 수 있다.

그림 5(c)는 오른쪽 단면의 평균 출력 파워와 -1 모드와 -2 모드의 출력 파워를 나타낸다. $\Delta\lambda_B$ 의 모든 영역에서 DFB 영역 1의 -1 모드가 DFB 영역 2의 금지대역 바깥에 존재하므로 DFB 영역 2로 진행이 크게 발생하여 오른쪽 단면에서 -1 모드의 출력 파워와 -2 모드의 출력 파워가 비슷한 크기를 가진다. 또한 $\Delta\lambda_B$ 가 증가함에 따라 -1 모드와 -2 모드의 이득이 감소하므로 왼쪽 단면에서 평균 출력 파워가 감소하는 것을 볼 수 있다. 그림 5(d)는 오른쪽 단면의 변조 지수를 나타낸다. 그림 5(c)에서 보듯이 $\Delta\lambda_B$ 의 모든 영역에서 두 발진 모드의 크기가 비슷하므로 모든 영역에서 변조지수가 거의 1에 가까운 것을 볼 수 있다.

그림 5(e)는 왼쪽 단면에서의 평균 출력 파워와 -1 모드와 -2 모드의 출력 파워를 나타낸다. $\Delta\lambda_B < \Delta$ 인 영역에서는

DFB 영역 2의 -2 모드가 DFB 영역 1의 금지 대역 내에 존재하여 DFB 영역 1로의 진행이 작게 발생하여 왼쪽 단면의 -2 모드의 출력 파워의 크기가 작다. $\Delta\lambda_B > \Delta$ 인 영역에서는 $\Delta\lambda_B$ 의 증가에 따라 -1 모드와 -2 모드의 출력 파워가 비슷한 크기로 감소하는 것을 볼 수 있다. 그림 5(f)는 왼쪽 단면에서의 변조 지수를 보여준다. 그림 5(e)와 식 (7)을 통하여 알 수 있듯이 $\Delta\lambda_B < \Delta$ 인 영역에서는 DFB 영역 2의 -2 모드가 DFB 영역 1로의 진행이 작게 발생하여 변조 지수가 작고 $\Delta\lambda_B > \Delta$ 인 영역에서는 -1 모드와 -2 모드가 모두 상대 DFB 영역으로 진행이 크게 발생하여 출력 파워에 대한 변조 지수가 매우 큼을 볼 수 있다.

V. 결 론

두 개의 DFB 영역과 위상 조정 영역으로 구성된 다중 영역 복소 결합 DFB 레이저에서 방출되는 두 모드의 비팅에 의해서 발생하는 SP 동작 특성에 대하여 살펴보았다. CC DFB 구조를 사용하는 다중 영역 DFB 레이저의 경우 DFB 영역의 금지대역폭과 두 DFB 영역의 반사 스펙트럼의 중첩 여부와 관계없이 각각의 DFB 영역에서 자체 CC 회절격자 특성에 의해서 결정되는 안정된 모드가 발진한다. 따라서 다중 영역 복소 결합 DFB 레이저에서 방출되는 두 모드의 비팅에 의하여 발생하는 SP 주파수는 두 DFB 영역의 회절격자의 주기 차이에 의하여 결정되어 짐을 볼 수 있었다. 반도체 매질의 이득 대역폭이 매우 넓으므로 CC 회절격자의 주기 차이를 변화시킴으로써 IP(AP) 회절격자를 가지는 다중 영역 DFB 레이저에서 발생하는 SP 주파수를 매우 낮은 주파수에서 약 3(2.7) THz까지 변화시킬 수 있었다. 이러한 발생되는 SP 주파수의 최대값은 DFB 영역에 사용하는 이득 매질의 이득 스펙트럼 폭에 의해서 결정되어진다고 생각된다.

또한 다른 DFB 영역의 회절격자 특성과는 상관없이 자기 영역에 존재하는 CC 회절격자의 특성에 의하여 발진 모드가 결정되므로 발진 모드가 다른 DFB 영역의 금지대역에 놓이지 않는 경우 발진되는 모드는 다른 DFB 영역으로 큰 반사 없이 진행하여 두 모드들 사이의 상호작용이 크게 발생하여 IC 회절격자를 가지는 다중 영역 DFB 레이저와는 달리 변조 지수가 매우 큰 출력을 얻을 수 있었다.

Photomixing 방법을 사용하여 테라헤르츠 파 생성을 위한 효율적인 외부 여기 광원으로 다중영역 복소 결합 DFB 레이저를 사용할 수 있으리라 생각된다.

감사의 글

이 논문은 2005년도 한국대학교육협의회 대학교수 국내교류 연구비 지원에 의한 것 임.

참고문헌

[1] M. Möhrle, B. Sartorius, C. Bornholdt, S. Bauer, O. Brox,

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

- 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] 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.
- [3] M. Saruwatari, "All-optical signal processing for terabit/second optical transmission," *IEEE J. Select. Topics on Quantum Electron.*, vol. 6, no. 6, pp. 1363-1374, 2000.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Daryoosh Saeedkia, Amir Hamed Majedi, Safieddin Safavi-Naeini, Raafat R. Mansour, "Analysis and Design of a Photoconductive Integrated Photomixer/Antenna for Terahertz Applications," *IEEE J. Quantum Electronics.*, vol. 41, no. 2, pp. 234-241, 2005.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] S. Iio, M. Suehiro, T. Hirata, T. Hidaka "Two-Longitudinal-Mode Laser Diodes," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 7, no. 9, 1995
- [10] 김상택, "다중 전극 DFB 레이저에서 발생하는 초고속 Self-Pulsation 현상에 관한 연구," 숭실대학교 대학원, 박사학위논문, 2005.
- [11] Sang-Taek Kim and Boo-Gyoun Kim, "Analysis of single-mode yield above threshold for complex-coupled distributed feedback lasers with asymmetric facet reflectivities," *J. Opt. Soc. Am. B.*, vol. 22, no. 5, 2005.
- [12] J. Carroll, J. Whiteaway, and D. Plumb, *Distributed feedback semiconductor lasers*, London: SPIE Optical Engineering Press, 1998.
- [13] 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.

A Multi-Section Complex-Coupled DFB Laser with a Very Wide Range of Self-Pulsation Frequency and High Modulation Index

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

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

[†]*E-mail: bgkim@e.ssu.ac.kr*

Sun-Ho Kim

Photonics Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791, KOREA

Kyung Hyun Park

Optical Devices Research Department, ETRI, Daejeon 305-700, KOREA

(Received March 3, 2006, Revised manuscript April 17, 2006)

We analyze the self-pulsation(SP) characteristics due to mode beating of two modes emitted in a multi-section complex-coupled (CC) DFB laser composed of two DFB sections and a phase control section between them. SP frequency due to mode beating of the two modes is determined by the difference of grating periods in the two CC DFB regions. As the difference of grating periods in the two CC DFB regions increases, the SP frequency increases from very low frequency to the THz region. In the case of a mode which is not located in the stop band of the other DFB region, the mode propagates into the other DFB region without a high reflection, so that output powers emitted in a multi-section CC DFB laser have high modulation indexes due to the large interaction between the two modes.

OCIS Codes : 140.3490, 140.5960, 140.2020.