

양 단면 반사율 조합과 결합 계수 비에 따른 Complex-Coupled DFB 레이저 다이오드의 파워 추출 효율과 발진 파장 분포

김상택 · 김부균[†]

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

(2003년 11월 6일 받음, 2004년 4월 8일 수정본 받음)

문턱 전류 이상에서 complex-coupled(CC) DFB 레이저의 여러 가지 $|xL|$ 과 양 단면 반사율 조합에 대하여 파워 추출 효율과 발진 파장 분포를 구하였고 문턱 전류에서의 결과와 비교하였다. 또한 결합 계수 비(CR)와 AR 단면의 반사율이 파워 추출 효율과 발진 파장 분포에 미치는 영향에 대하여 살펴보았다. 문턱 전류에서 in-phase(IP) CC DFB 레이저와 anti-phase(AP) CC DFB 레이저의 파워 추출 효율에 대하여 도시한 단일 모드 수율은 정확히 일치하였다. 그러나 문턱 전류 이상에서는 IP CC DFB 레이저의 파워 추출에 대하여 도시한 단일 모드 수율은 AP CC DFB 레이저보다 크게 나타났다. IP CC DFB 레이저의 경우 양 단면 반사율 조합이 AR-HR의 경우가 다른 반사율 조합에 비해 단일 모드 수율이 크고 또한 파워 추출 효율이 큼을 알 수 있었다. 본 논문에서 고려한 경우 중에서 $|xL|$ 이 0.8이고 AR-HR인 경우가 문턱 전류 이상에서 단일 모드 수율과 파워 추출 효율이 가장 컸다. 양 단면 반사율 조합이 AR-HR인 경우 CR이 커질수록, AR 단면의 반사율이 작아질수록 spatial hole burning 현상이 완화되어 단일 모드 수율과 파워 추출 효율이 커졌다. 양 단면 반사율 조합이 AR-HR인 경우 CC DFB 레이저의 발진 파장은 DFB 금지 대역 내에 넓게 분포하였다. CR이 증가할수록 IP CC DFB 레이저는 장파장 모드에, AP CC DFB 레이저는 단파장 모드에 발진 파장 분포가 증가하였다. $|xL|$ 이 커질수록 발진 파장이 존재하는 파장 폭이 작아 지고 발진 파장 분포가 장파장 쪽으로 이동하였다.

주제어 : complex coupled DFB laser, power extraction efficiency.

I. 서 론

WDM 시스템에서 장거리 대용량 전송을 위해서는 출력 파워가 크고 선폭이 좁고 안정된 단일 모드로 동작하는 광원이 필요하다. Distributed feedback(DFB) 레이저는 다른 반도체 레이저에 비해 안정된 단일 모드 동작이 가능하기 때문에 광통신용 소자로 많이 사용되고 있다. Complex coupled(CC) DFB 레이저는 index coupled(IC) DFB 레이저에 비하여 단일 모드 수율이 크고, 선폭이 좁고, 주파수 침이 적고, 온도에 대한 영향이 작으며, 양 단면의 반사율과 격자 위상이 레이저 동작 특성에 미치는 영향이 작다는 많은 장점을 가지고 있다.^[1-3] WDM 시스템에서 다중 파장 광원으로 사용하기 위하여 DFB 레이저 어레이는 정확한 발진 파장 조절이 가능하며 단일 모드 수율이 높고 출력 파워가 커야 한다.^[4,5]

DFB 레이저의 양 단면의 반사율을 다르게 함으로써 한쪽 단면에서 출력 파워의 추출 효율을 높일 수 있었다. 그러나 대부분의 경우 양 단면 반사율 조합에 따른 파워 추출 효율은 문턱 전류에서 연구되었다.^[6-8] 한쪽 단면은 anti-reflection(AR) 코팅하고 다른 단면은 high-reflection(HR) 코팅하면 문턱 전류에서 높은 단일 모드 수율을 유지하면서 AR 단면에서 파워 추출 효율을 높일 수 있었다.^[6,7] 또한 결합 계수와 레이저 공진기의 길이를 조절하여 최대 출력 파워, 단일 모

드 수율과 slope efficiency(η)를 향상시킬 수 있었다.^[5] Liew는 loss-coupled(LC) DFB 레이저에서 결합 세기와 이득 결합 비에 따른 파워 추출 효율의 변화에 대하여 살펴보았다.^[8]

CC DFB 레이저의 발진 파장은 일반적으로 금지 대역 양쪽의 단파장 또는 장파장에 분포되어 있다. 장파장 모드의 필드 분포는 유효 굴절율이 큰 회절격자에 구속되어 있고 반면에 단파장 모드의 필드 분포는 유효 굴절율이 작은 회절격자에 구속되어 있다.^[9] 따라서 인덱스 회절격자와 이득 회절격자가 동 위상인 in-phase(IP) CC DFB 레이저는 대부분 장파장 모드에서 발진하고 인덱스 회절격자와 이득 회절격자의 위상이 180° 차이가 나는 anti-phase(AP) CC DFB 레이저는 대부분 단파장 모드에서 발진하게 된다. 그러나 이러한 발진 파장은 양 단면 반사율과 격자 위상에 따라, 또한 인덱스 결합 계수 (x_i)와 이득 결합 계수 (x_g)의 비인 x_g/x_i 로 정의되는 결합 계수 비(Coupling coefficient Ratio, CR)에 따라 변화하게 된다. 그러나 단일 모드 조건을 만족하는 발진 파장의 분포에 대한 연구는 대부분의 경우 문턱 전류에서 수행되었다. Susa는 문턱 전류에서 gain-coupled(GC) DFB 레이저의 양 단면 반사율에 따른 발진 파장 분포와 AR 단면의 반사율이 발진 파장 분포에 미치는 영향에 대하여 살펴보았다.^[1] Hong 등은 GC DFB 레이저에 대하여 양 단면의 격자 위상이 발진 파장, 문턱 전류, 정규화된 이득 마진 등에 미치는 영향과, 양 단면 출력 파워 비와 정규화 된 이득 마진의 관계에 대하여 검토하였다.^[3] Hansmann 등의 경우 LC

[†]E-mail: bgkim@e.ssu.ac.kr

DFB 레이저에 대하여 loss-coupling 계수에 따른 단일 모드 수율과, 양 단면 반사율 조합에 따른 발진 파장 분포를 계산하였다.^[10] 또한 열적 튜닝에 의해서 발진 파장을 0.5 nm 변화시킬 수 있었으며 이 경우 부 모드 억제 비는 거의 변화가 없고 출력 파워의 감소는 1 dB 이하였다고 보고하였다.

그러나 파워 추출 효율과 단일 모드 조건을 만족하는 발진 파장의 분포에 대한 연구는 대부분의 경우 문턱 전류에서 수행되었다. 본 논문에서는 문턱 전류 이상에서 CC DFB 레이저의 파워 추출 효율과 발진 파장 분포를 구하고 이를 문턱 전류에서의 결과와 비교 검토하고 주입 전류에 따라 어떻게 변화하는지 살펴보고자 한다. 또한 양 단면 반사율 조합과 결합 계수 비가 파워 추출 효율과 발진 파장 분포에 미치는 영향에 대하여 살펴보고, IP CC DFB 레이저와 AP CC DFB 레이저의 파워 추출 효율과 발진 파장 분포를 서로 비교한다. 양 단면 반사율 조합을 구성하는 CL(cleaved facet)은 32%, HR은 90%, 그리고 AR은 0.1%에서 5%까지 고려하였다. 또한 계산에 사용된 결합 세기 $|xL|$ 은 0.8, 1.25, 2와 3이다. CC DFB 레이저 특성을 해석하기 위하여 레이저를 종축 방향으로 여러 개의 섹션으로 분할하고 각 섹션에서는 소자 파라미터를 상수로 가정하여 계산하는 전달행렬방법^[11]을 사용하였다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 CC DFB 레이저의 특성 해석 방법에 대하여 간략히 설명하였고 3장에서는 IP CC DFB 레이저와 AP CC DFB 레이저에 대하여 결합 계수 비와 양 단면 반사율 조합에 따른 파워 추출 효율과 발진 파장 분포를 살펴보았다. 마지막으로 4장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

II. DFB 레이저 특성 해석 방법

반도체 레이저의 특성 해석을 위해서는 공진기 내부의 전체 분포를 구하는 결합모드 방정식과 캐리어 밀도와 광자 밀도의 관계를 나타내는 비율 방정식을 동시에 풀어야 한다. 그러나 문턱 전류 이상에서는 공진기 내부의 불규칙한 광자 분포를 고려한 해석적인 해를 구할 수가 없기 때문에 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 해를 구한다. 문턱 전류 이상에서 spatial hole burning(SHB) 현상을 고려하기 위하여 전달행렬 방법을 사용하여 두 방정식을 동시에 만족하는 각각의 모드 이득(α_m)과 파장(δ_m)을 구하여 주 모드와 부 모드의 정규화된 이득 마진($\Delta\alpha L$)을 구할 수 있다.^[11]

그림 1은 해석에 사용된 양 단면 반사 계수와 양 단면 격자 위상을 고려한 DFB 레이저의 개념도를 나타내는 그림이다. 순방향과 역방향으로 진행되는 정규화된 필드 크기 $a(z)$ 와 $b(z)$ 는 결합모드 방정식과 양 단면에서 경계 조건을 만족해야 한다. 또한 문턱 전류 이상에서는 캐리어 밀도와 광자 밀도의 관계를 나타내는 비율 방정식을 만족해야 한다. 이렇게 구해진 각각의 모드로부터 정규화된 이득 마진을 구할 수 있다. 그러나 DFB 레이저 제작 시에 단면 격자의 위상은 매우 불규칙하기 때문에 단일 모드로 발진하는 수율은 확률적

으로 계산된다. 따라서 단일 모드 수율은 격자 위상의 전체 경우 수에서 정규화된 이득 마진이 단일 모드 발진에 필요한 값 $\Delta\alpha L_{SM}$ 이상이 되는 격자 위상의 수에 대한 비로 구할 수 있다. 또한 단일 모드 조건을 만족하는 발진 모드로부터 파워 추출 효율과 발진 파장 분포를 구할 수 있다. 본 논문에서는 단일 모드 발진에 필요한 정규화된 이득 마진 $\Delta\alpha L_{SM}$ 은 0.1로 하였다.^[1,2] 양 단면의 격자 위상의 전체 경우 수는 16×16 으로 하였고 계산에 사용된 파라미터는 표 1과 같다.

DFB 레이저의 특성을 해석할 때 전달 행렬 방법을 사용하면 공진기 내의 파워 분포를 구할 수 있다. 따라서 DFB 레이저 양 단면의 출력 파워와 파워 추출 효율을 구할 수 있다. 파워 추출 효율은 전체 출력 파워에 대한 한쪽 단면의 출력 파워의 비로 다음과 같이 정의된다.

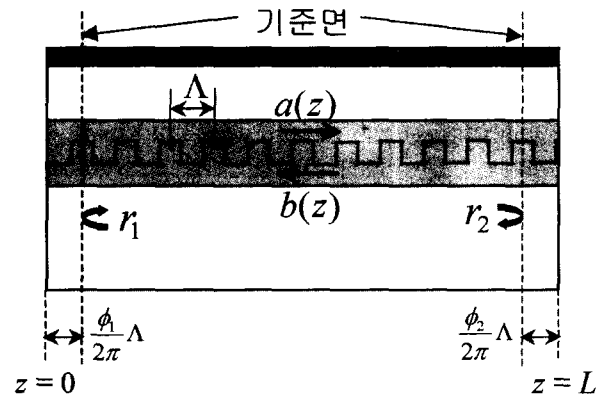


그림 1. 양 단면 반사 계수와 양 단면 격자 위상을 고려한 DFB laser의 개념도.

표 1. 계산에 사용된 파라미터

Parameter		Unit	Description
d	0.12	μm	active region thickness
w	1.5	μm	active region width
L	400	μm	cavity length
n_g	3.7		group refractive index
A	2.5×10^8	s^{-1}	linear recombination coefficient
B	10^{-16}	$m^3 s^{-1}$	bimolecular recombination coefficient
C	3×10^{-41}	$m^6 s^{-1}$	auger recombination coefficient
α_H	5		linewidth enhancement factor
N_0	1.15×10^{24}	m^{-3}	transparency carrier density
Γ	0.35		confinement factor
α_0	20×10^2	m^{-1}	internal loss
g_N	2.7×10^{-20}	m^{-2}	differential gain
λ_B	1.55	μm	Bragg wavelength
ϵ	5×10^{-23}	m^3	nonlinear gain suppression coefficient

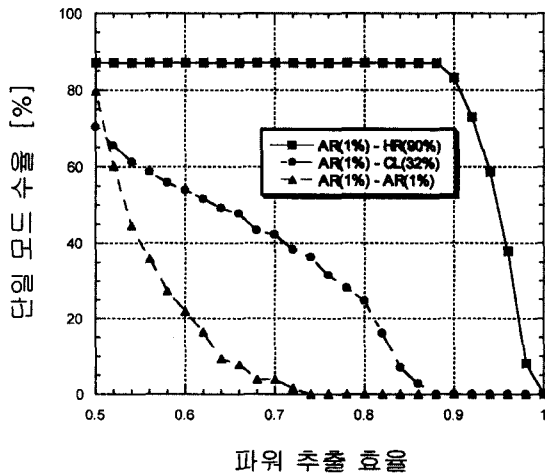
$$\text{파워 추출 효율} = \frac{\text{Max}(P_L, P_R)}{P_L + P_R} \quad (1)$$

여기서 P_L 과 P_R 은 각각 그림 1에서 DFB 레이저의 왼쪽 단면과 오른쪽 단면의 출력 파워를 의미한다. 파워 추출 효율은 0.5에서 1까지의 값을 가지며 0.5는 양 단면의 출력 파워가 같음을 의미하고 1은 전체 출력 파워가 한쪽 단면으로만 출력됨을 의미한다.

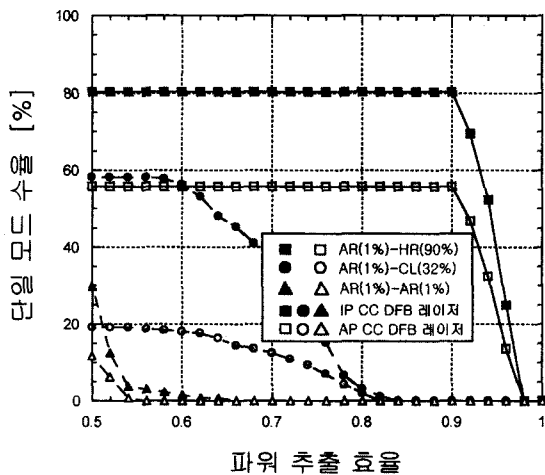
III. 계산 결과 및 검토

3.1. 파워 추출 효율(Power extraction efficiency)

그림 2는 $|xL|$ 이 0.8이고 CR이 0.2일 때 여러 가지 양 단면 반사율 조합에 대하여 파워 추출 효율의 함수로 도시한 CC DFB 레이저의 단일 모드 수율을 나타내는 그림이다. 그



(a) $J/J_{th} = 1$



(b) $J/J_{th} = 3$

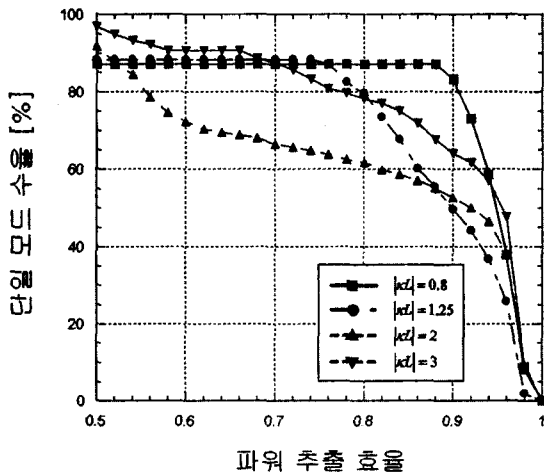
그림 2. $|xL|$ 이 0.8이고 CR이 0.2일 때 여러 가지 양 단면 반사율 조합에 대하여 파워 추출 효율의 함수로 도시한 CC DFB 레이저의 단일 모드 수율.

림 2(a)는 문턱 전류에서 구한 결과이고 그림 2(b)는 3배의 문턱 전류에서 구한 결과이다. 예상대로 양 단면 반사율의 비대칭성이 커질수록 파워 추출 효율이 큼을 알 수 있다. 문턱 전류에서 IP CC DFB 레이저와 AP CC DFB 레이저의 파워 추출 효율에 대하여 도시한 단일 모드 수율은 정확히 일치하였다. AR-HR인 경우 문턱 전류에서 단일 모드 수율은 87%이었고 이러한 경우는 모두 파워 추출 효율이 0.85 이상이었다. 이것은 전체 격자 위상의 경우의 수에 대하여 87%가 단일 모드 조건을 만족하고 HR 단면의 출력 파워 보다 AR 단면의 출력 파워가 4배 보다 큼을 의미한다. 그러나 AR-CL의 경우는 단일 모드 수율은 71%이었으나 파워 추출 효율이 0.8 이상인 단일 모드 수율은 26%로 AR-HR에 비하여 매우 낮았다. 양 단면이 대칭인 AR-AR인 경우 예상대로 파워 추출 효율이 매우 낮았다. 문턱 전류에서 단일 모드 수율은 80%이었으나 파워 추출 효율이 0.8 이상인 단일 모드 수율은 0이었다.

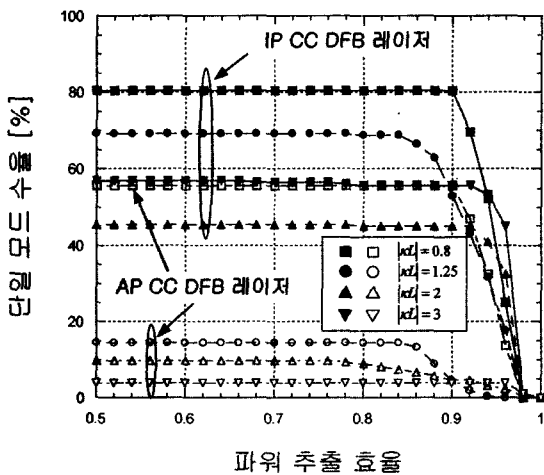
그림 2(b)는 3배의 문턱 전류에서 파워 추출 효율에 대하여 도시한 IP CC DFB 레이저와 AP CC DFB 레이저의 단일 모드 수율을 나타내는 그림이다. 문턱 전류에서 IP CC DFB 레이저와 AP CC DFB 레이저의 파워 추출 효율에 대하여 도시한 단일 모드 수율은 일치하였으나 문턱 전류 이상에서는 큰 차이를 나타냈다. IP CC DFB 레이저의 경우 양 단면 반사율 조합이 AR-HR일 때 3배의 문턱 전류에서 단일 모드 수율은 81%로 문턱 전류에서의 단일 모드 수율 87%에 비해 약 6%가 감소하였으나 단일 모드 조건을 만족하는 모든 경우는 파워 추출 효율이 0.9 이상으로 문턱 전류에서보다 약간 증가함을 알 수 있다. 즉 단일 모드 조건을 만족하는 모든 경우에 대한 파워 추출 효율이 문턱 전류인 경우에 비하여 향상됨을 알 수 있다. 반면에 AP CC DFB 레이저의 경우 문턱 전류에 비하여 단일 모드 수율이 크게 감소함을 알 수 있다. 이것은 AP CC DFB 레이저의 경우 주입 전류가 증가하게 되면 회절 격자의 굴절을 변화로 인하여 발진 모드가 불안정하게 되기 때문이라 생각된다.^[12] 양 단면 반사율 조합이 AR-HR인 경우 3배의 문턱 전류에서 단일 모드 수율은 약 58%로 문턱 전류에서의 결과 보다 약 30% 감소하였으나 파워 추출 효율은 0.9 이상으로 IP CC DFB 레이저의 경우와 일치하였다. 양 단면 반사율 조합이 AR-CL인 경우 AR-HR인 경우와 마찬가지로, 3배의 문턱 전류에서 파워 추출의 함수로 도시한 IP CC DFB 레이저의 단일 모드 수율은 문턱 전류에서의 수율에 비해 조금 감소하였으나 AP CC DFB 레이저의 단일 모드 수율은 크게 감소함을 알 수 있다. 양 단면이 대칭인 AR-AR인 경우 예상대로 파워 추출 효율이 매우 낮았고 또한 문턱 전류에 비해 단일 모드 수율이 크게 감소하였다. $|xL|$ 이 1.25, 2와 3인 경우에도 그림 2의 경우와 비슷한 경향이 나타났으며, 양 단면의 비대칭성이 큰 AR-HR인 경우가 파워 추출 효율이 가장 크게 나타남을 알 수 있었다.

그림 3은 양 단면이 AR(1%)-HR(90%)이고 CR이 0.2일 때 여러 가지 $|xL|$ 에 대하여 파워 추출 효율의 함수로 도시한 CC DFB 레이저의 단일 모드 수율을 나타내는 그림이다. 그

림 3(a)와 (b)는 각각 문턱 전류와 3배의 문턱 전류에서 구한 결과이다. $|xL|$ 이 0.8인 경우 문턱 전류에서 단일 모드 조건을 만족하는 모든 경우(87%)가 파워 추출 효율이 0.85 이상이었다. 반면에 $|xL|$ 이 1.25인 경우 문턱 전류에서 단일 모드 수율은 89%로 $|xL|$ 이 0.8인 경우에 비해 약간 컸으나 이러한 모든 경우에 대하여 파워 추출 효율은 0.75 이상으로 $|xL|$ 이 0.8인 경우에 비해 작았다. $|xL|$ 이 2와 3인 경우 요구되는 파워 추출 효율이 커질수록 단일 모드 수율은 거의 선형적으로 감소하여 파워 추출 효율이 0.95 이상에서는 단일 모드 수율이 급격하게 감소하였다. 이것은 $|xL|$ 이 2와 3인 경우 $|xL|$ 이 0.8과 1.25인 경우에 비하여 SHB 현상으로 광자 밀도가 DFB 레이저의 중앙 부분에 집중되어 $|xL|$ 이 0.8과 1.25인 경우에 비하여 양 단면에서의 파워의 비대칭성이 상대적으로 작아지게 되기 때문이라 생각된다.



(a) $J/J_{th} = 1$



(b) $J/J_{th} = 3$

그림 3. 양 단면이 AR(1%)-HR(90%)이고 CR 값이 0.2일 때 여러 가지 $|xL|$ 에 대하여 파워 추출 효율의 함수로 도식한 CC DFB 레이저의 단일 모드 수율.

그러나 문턱 전류 이상에서의 파워 추출 효율은 다른 경향을 나타냈다. 그림 3(b)는 3배의 문턱 전류에서 IP CC DFB 레이저와 AP CC DFB 레이저의 파워 추출 효율에 대하여 도시한 단일 모드 수율을 나타내는 그림이다. IP CC DFB 레이저의 경우 $|xL|$ 이 0.8일 때 단일 모드 수율은 약 80%이고 이러한 경우는 모두 파워 추출 효율이 0.9 이상이다. 문턱 전류에 비해 단일 모드 수율이 약 7% 감소하였으나 파워 추출 효율은 약간 증가하였다. $|xL|$ 이 1.25, 2와 3인 경우도 각각 70%, 45%와 57%로 비교적 높은 단일 모드 수율을 나타냈다. $|xL|$ 이 1.25인 경우 문턱 전류에서는 $|xL|$ 이 0.8인 경우보다 단일 모드 수율이 약간 크게 나타났으나 3배의 문턱 전류에서는 $|xL|$ 이 0.8인 경우보다 작게 나타났다. 3배의 문턱 전류에서 단일 모드 조건을 만족하는 모든 경우 $|xL|$ 이 0.8, 1.25, 2와 3일 때 각각 파워 추출 효율이 0.9, 0.85, 0.92와 0.92 이상으로 문턱 전류에서 보다 좋아짐을 알 수 있다.

AP CC DFB 레이저의 경우 $|xL|$ 이 0.8인 경우 3배의 문턱 전류에서 단일 모드 수율은 약 56%로, $|xL|$ 이 1.25, 2와 3인 경우의 단일 모드 수율 15%, 10%와 5% 보다 매우 큼을 볼 수 있었다. 즉 $|xL|$ 이 0.8인 경우는 다른 $|xL|$ 인 경우와 비교하여 단일 모드 수율의 감소가 작게 발생함을 알 수 있었다.

그림 4는 양 단면이 AR(1%)-HR(90%)이고 $|xL|$ 이 1.25이며 CR이 0.2일 때 파워 추출 효율과 정규화된 이득 마진의 분포를 나타내는 그림이다. 그림 4(a)는 문턱 전류일 때 파워 추출 효율과 정규화된 이득 마진의 분포를 나타내는 그림으로 정규화된 이득 마진이 0.1 이상인 모든 경우는 파워 추출 효율이 0.75 이상임을 알 수 있다. 그림 4(b)는 3 배의 문턱 전류에서 파워 추출 효율과 정규화된 이득 마진의 분포를 나타내는 그림으로 IP CC DFB 레이저인 경우 정규화된 이득 마진이 0.1 이상인 모든 경우는 파워 추출 효율이 0.85 이상임을 알 수 있다. 반면에 AP CC DFB 레이저의 경우 대부분 정규화된 이득 마진이 0.1 보다 작아 단일 모드 조건을 만족하지 못하여 단일 모드 수율이 작음을 알 수 있다.

IP CC DFB 레이저의 경우 문턱 전류에서 파워 추출 효율이 0.85 보다 작은 경우는 3배의 문턱 전류에서 파워 추출 효율이 0.85 이상으로 커지거나, 정규화된 이득 마진이 감소하여 단일 모드 조건을 만족하지 못했다. 즉 파워 추출 효율이 작은 대부분의 경우는 주입 전류의 증가에 따라 파워 추출 효율이 커졌거나 정규화된 이득 마진이 감소하였음을 알 수 있다.

그림 5는 양 단면이 AR(1%)-HR(90%)이고 $|xL|$ 이 1.25 일 때 여러 가지 CR에 대하여 파워 추출 효율의 함수로 도식한 IP CC DFB 레이저의 단일 모드 수율을 나타내는 그림이다. 문턱 전류에서 CR이 커질수록 IP CC DFB 레이저의 단일 모드 수율과 단일 모드 조건을 만족하는 모든 경우에 대한 파워 추출 효율이 약간 커짐을 알 수 있다. CR이 0일 때 단일 모드 수율은 85%이고 단일 모드 조건을 만족하는 모든 경우가 파워 추출 효율이 0.74 이상이었으나 CR이 1일 때는 단일 모드 수율이 94%이고 파워 추출 효율이 0.82 이상이었다.

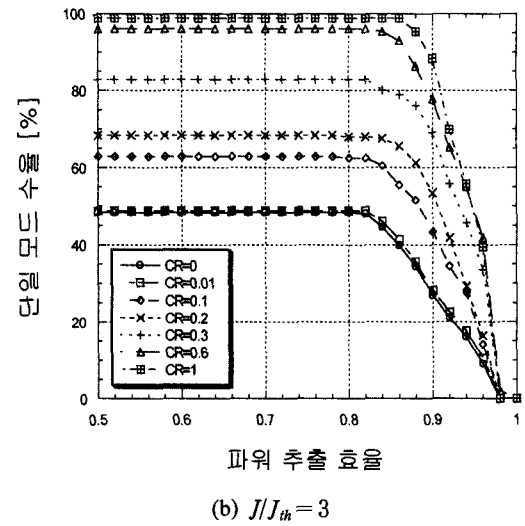
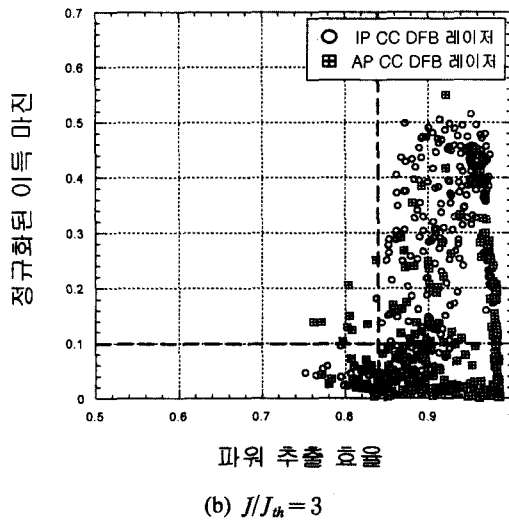
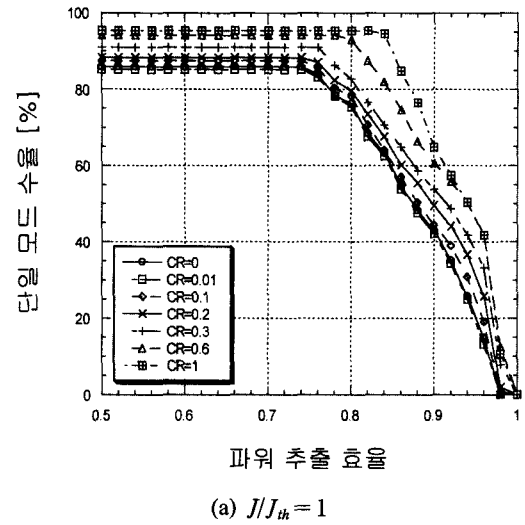
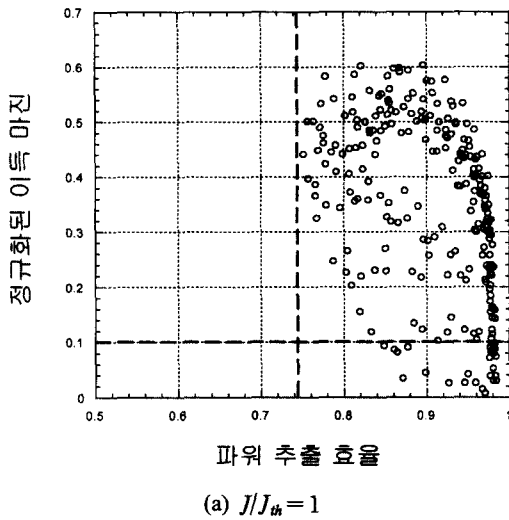


그림 4. 양 단면이 AR(1%)-HR(90%)이고 $|xL|$ 이 1.25이며 CR이 0.2일 때 파워 추출 효율과 정규화된 이득 마진의 분포.

그림 5. 양 단면이 AR(1%)-HR(90%)이고 $|xL|$ 이 1.25일 때 여러 가지 CR에 대하여 파워 추출 효율의 함수로 도식한 IP CC DFB 레이저의 단일 모드 수율.

3배의 문턱 전류에서는(그림 5(b)) CR에 따른 단일 모드 수율의 변화량은 문턱 전류에 비해 매우 크게 나타났다. 그 이유는 문턱 전류에서는 CR에 관계없이 레이저 공진기 내부의 파워 세기가 매우 작고 또한 광자 분포가 거의 균일하여 SHB 현상이 거의 발생되지 않으나, 3배의 문턱 전류에서는 SHB 현상이 심하게 발생하나 CR이 커질수록 공진기 내의 광자 분포가 좀더 균일해져 SHB 현상이 완화되기 때문이다. 그림 5(b)에서 CR이 0일 때 단일 모드 수율은 50%인 반면 CR이 1일 때는 SHB 현상이 거의 발생되지 않아 98%로 매우 높은 단일 모드 수율을 나타냈다. 3배의 문턱 전류에서 파워 추출 효율은 문턱 전류에 비해 약간 크게 나타났고 또한 CR이 커질수록 파워 추출 효율이 조금 크게 나타났다. $|xL|$ 이 0.8인 경우에도 CR에 따른 단일 모드 수율과 파워 추출 효율은 그림 5와 비슷한 경향을 나타냈다.

양 단면이 대칭인 AR-AR인 경우 예상대로 파워 추출 효율이 매우 낮게 나타났다. 문턱 전류에서 CR에 관계없이 요구되는 파워 추출 효율이 커질수록 단일 모드 수율은 급격하게 감소하였다. 3배의 문턱 전류에서 파워 추출 효율은 문턱 전류에 비하여 조금 커졌으나 요구되는 파워 추출 효율이 커질수록 단일 모드 수율은 급격하게 감소하였다.

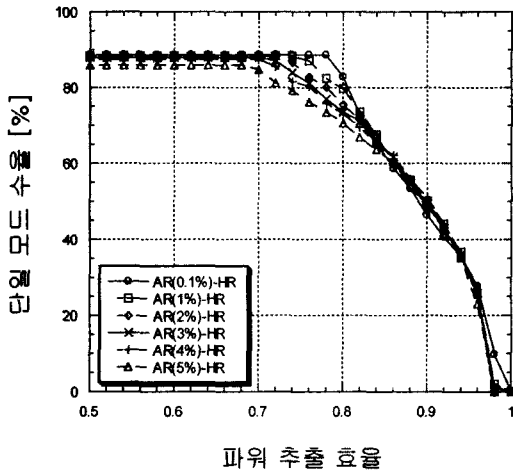
그림 6은 양 단면이 AR-HR(90%)이고 $|xL|$ 이 1.25이며 CR이 0.2일 때 여러 가지 AR 단면 반사율에 대하여 파워 추출 효율의 함수로 도식한 IP CC DFB 레이저의 단일 모드 수율을 나타내는 그림이다. 문턱 전류에서는(그림 6(a)) AR 단면의 반사율이 작을수록 단일 모드 수율은 증가하지만 그 증가는 매우 작게 나타났다. 반면에 3배의 문턱 전류에서는(그림 6(b)) AR 단면 반사율에 따른 단일 모드 수율의 변화량이 매우 컸다. 그 이유는 문턱 전류에서는 AR 단면 반사

울에 관계없이 공진기 내부에 존재하는 파워가 매우 작아 SHB 현상이 거의 발생되지 않으나, 3배의 문턱 전류에서는 AR 단면의 반사율이 커질수록 공진기 내부의 중앙부근에 광자가 더욱 집중되어 SHB 현상이 크게 발생되기 때문이라 생각된다. 그림 6(b)에서 AR 단면 반사율이 0.1%일 때는 단일 모드 수율이 85%이었으나 AR 단면 반사율이 5%일 때는 45%로 약 40%가 감소하였다. AR 단면의 반사율이 작아질수록, 즉 양 단면 반사율의 비대칭성이 커질수록 파워 추출 효율이 약간 커졌다. 양 단면이 AR(1%)-AR(1%)인 경우 AR 단면의 반사율이 작을수록 단일 모드 수율은 커졌으나 양 단면 반사율의 대칭성으로 인하여 AR 단면의 반사율에 관계없이 파워 추출 효율이 매우 작음을 알 수 있었다.

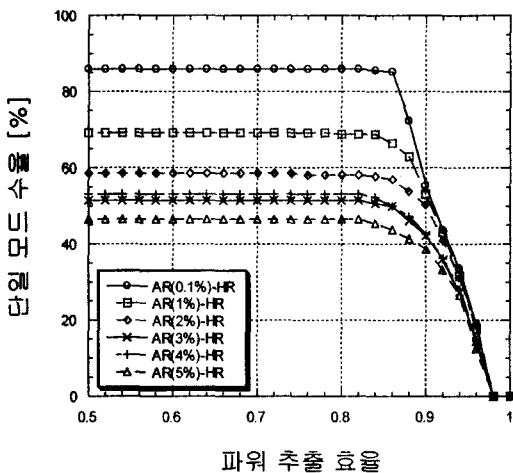
3.2. 발진 파장 분포

CC DFB 레이저의 발진 파장은 양 단면의 반사율과 격자

위상의 변화에 따라서 변하게 된다. 따라서 CC DFB 레이저의 발진 파장은 양 단면 격자 위상의 조합에 대하여 통계적인 분포로서 나타낸다. 그림 7은 양 단면이 AR(1%)-HR(90%)이고 CR이 0.2이며 $|xL|$ 이 0.8일 때 CC DFB 레이저의 문턱 전류와 3배의 문턱 전류일 때의 발진 파장 분포를 나타내는 그림이다. 그림에서 발진 파장의 경우 수는 전체 격자 위상 조합의 수 16×16 중에서 단일 모드 조건을 만족하는 CC DFB 레이저의 위상 조합의 수이다. 그림 7은 양 단면이 AR-HR인 CC DFB 레이저의 발진 파장 분포로 HR 단면의 반사율이 AR 단면의 반사율에 비해 상대적으로 크기 때문에 모드 degeneracy 현상이 나타나지 않고 DFB 금지 대역 내에 넓게 분포함을 알 수 있다. 그림 7(a)의 IP CC DFB 레이저의 경우 문턱 전류에서 발진 파장 분포는 DFB 금지 대역 내에 넓게 분포하나 장파장 모드 근처에 좀더 많이 분포함을 알 수

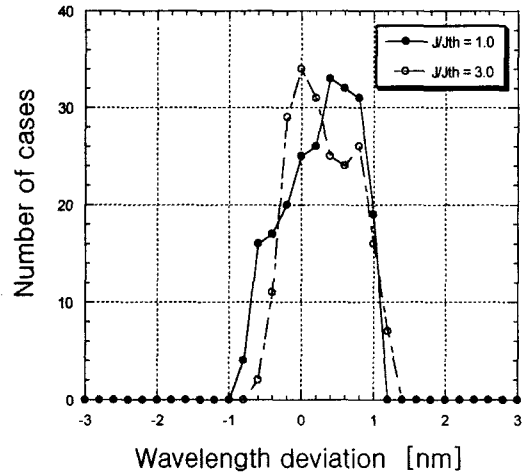


(a) $J/J_{th} = 1$

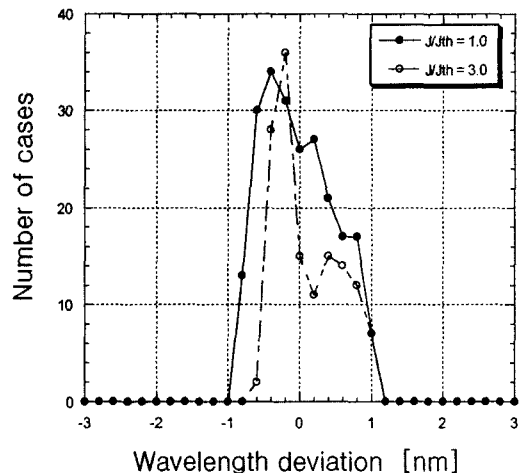


(b) $J/J_{th} = 3$

그림 6. 양 단면이 AR-HR(90%)이고 $|xL|$ 이 1.25이며 CR이 0.2일 때 여러 가지 AR 단면 반사율에 대하여 파워 추출 효율의 함수로 도시한 IP CC DFB 레이저의 단일 모드 수율.



(a) IP CC DFB 레이저



(b) AP CC DFB 레이저

그림 7. 양 단면이 AR(1%)-HR(90%)이고 CR이 0.2이며 $|xL|$ 이 0.8일 때 CC DFB 레이저의 문턱 전류와 3 배의 문턱 전류일 때의 발진 파장 분포.

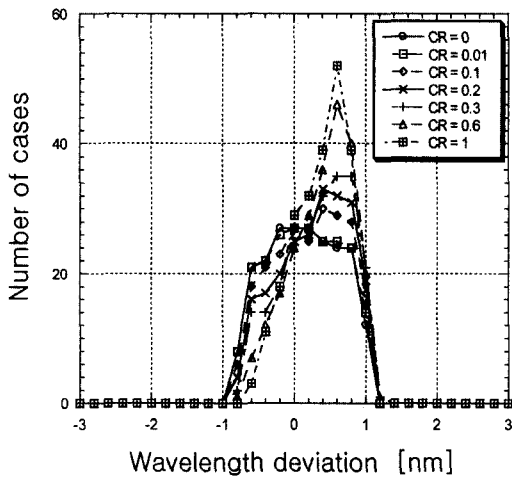
있다. 3배의 문턱 전류에서는 문턱 전류에 비해 약간 단파장 쪽으로 이동하여 발진 파장이 분포하였다. 그림 7(b)의 AP CC DFB 레이저의 경우 발진 파장이 DFB 금지 대역 내에 넓게 분포하였으나 IP CC DFB 레이저와 비교하면 단파장 모드에 좀더 많이 분포함을 알 수 있다. $|xL|$ 이 커질수록 HR 단면의 영향이 상대적으로 감소하여 IP CC DFB 레이저의 경우 장파장 모드에, AP CC DFB 레이저의 경우 단파장 모드에 발진 파장 분포가 증가함을 알 수 있었다.

DFB 레이저의 발진 파장은 열적 튜닝에 의해서 발진 파장을 0.5 nm 범위까지 변화시킬 수 있으며 이 경우 부 모드 억제 비는 거의 변화가 없고 출력 파워의 감소는 1 dB 이하였다고 보고되었다.^[10] 그림 7(a)에서 IP DFB 레이저의 경우 문턱 전류에서 중심 파장으로부터 0.5 nm 범위 내에 존재하는 발진 파장 분포는 36%이었고 문턱 전류 이상에서는 39%로 약간 증가하였다. AP DFB 레이저의 경우 문턱 전류에

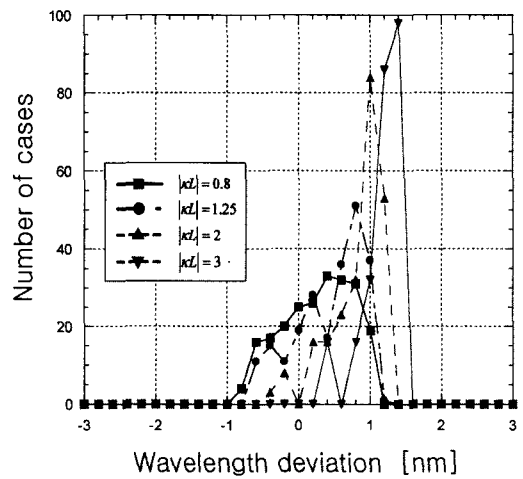
서 35%이었고 문턱 전류 이상에서는 49%로 증가하였다.

그림 8은 양 단면이 AR(1%)-HR(90%)이고 $|xL|$ 이 0.8일 때 여러 가지 CR에 대하여 나타낸 IP CC DFB 레이저의 발진 파장 분포를 나타내는 그림이다. 문턱 전류에서 CR이 커질수록 금지대역 내에 넓게 분포한 발진 파장 분포가 장파장 모드 쪽으로 조금 이동하였고 발진 파장이 존재하는 폭은 감소하였다. 3배의 문턱 전류에서는 단일 모드 조건을 만족하는 경우의 수가 약간 감소하였고 CR에 따른 발진 파장 분포의 변화는 매우 작았다. 그러나 CR이 커질수록 문턱 전류에 비해 발진 파장이 단파장 모드 근처에 많이 분포되어 있음을 알 수 있다.

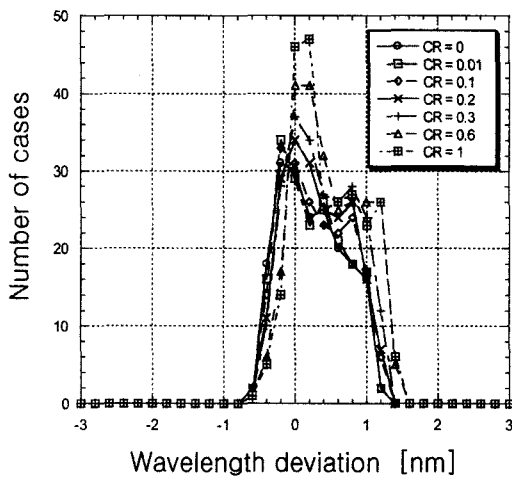
그림 9는 양 단면이 AR(1%)-HR(90%)이고 CR 값이 0.2일 때 여러 가지 $|xL|$ 에 대하여 나타낸 IP CC DFB 레이저의 발진 파장 분포를 나타내는 그림이다. 문턱 전류에서 $|xL|$ 이 커질수록 발진 파장이 존재하는 파장 폭이 작아지고 발진 파



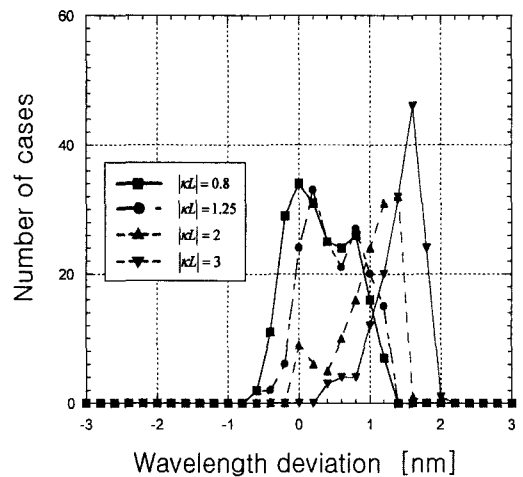
(a) $J/J_{th} = 1$



(a) $J/J_{th} = 1$



(b) $J/J_{th} = 3$



(b) $J/J_{th} = 3$

그림 8. 양 단면이 AR(1%)-HR(90%)이고 $|xL|$ 이 0.8일 때 여러 가지 CR에 대하여 나타낸 IP CC DFB 레이저의 발진 파장 분포.

그림 9. 양 단면이 AR(1%)-HR(90%)이고 CR 값이 0.2일 때 여러 가지 $|xL|$ 에 대하여 나타낸 IP CC DFB 레이저의 발진 파장 분포.

장 분포가 장파장 쪽으로 이동함을 알 수 있다. 이것은 $|xL|$ 이 커질수록 DFB의 금지 대역이 넓어지고 또한 동일한 CR에 대하여 이득 결합 계수 x_g 가 커지므로 생각된다. 3배의 문턱 전류에서 단일 모드 수율은 감소하였으나 $|xL|$ 에 대한 발진 파장 분포는 문턱 전류와 마찬가지로 $|xL|$ 이 커질수록 발진 파장이 존재하는 파장 폭이 작아지고 발진 파장 분포가 장파장 쪽으로 이동함을 알 수 있다

IV. 결 론

본 논문에서는 문턱 전류 이상에서 CC DFB 레이저의 여러 가지 $|xL|$ 과 양 단면 반사율 조합에 대하여 파워 추출 효율과 발진 파장 분포를 구하였고 그 결과를 문턱 전류에서의 결과와 비교하였다. 또한 결합 계수 비와 AR 단면의 반사율이 파워 추출 효율과 발진 파장 분포에 미치는 영향에 대하여 살펴보았다.

문턱 전류에서 IP CC DFB 레이저와 AP CC DFB 레이저의 파워 추출 효율에 대하여 도시한 단일 모드 수율은 정확히 일치하였으나 문턱 전류 이상에서는 큰 차이를 나타냈다. IP CC DFB 레이저의 경우 양 단면 반사율의 비대칭성이 큰 AR-HR의 경우가 다른 반사율 조합에 비해 단일 모드 수율이 크고 또한 파워 추출 효율이 큼을 알 수 있었다. 또한 문턱 전류에 비해 단일 모드 수율은 약간 감소하였으나 파워 추출 효율은 증가하였다. 본 논문에서 고려한 경우 중에서 양 단면 반사율 조합이 AR-HR이고 $|xL|$ 이 0.8인 경우가 3배의 문턱 전류에서 단일 모드 수율이 81%로 가장 크고 또한 파워 추출 효율도 0.9 이상으로 가장 컸다. 반면에 양 단면 반사율 조합이 AR-CL 및 AR-AR인 경우 예상대로 단일 모드 수율과 파워 추출 효율이 AR-HR에 비하여 작았다.

AP CC DFB 레이저의 경우 3배의 문턱 전류에서 파워 추출 효율에 대하여 도시한 단일 모드 수율은 IP CC DFB 레이저에 비해 매우 작았다. 양 단면 반사율 조합이 AR-HR이고 $|xL|$ 이 0.8인 경우 다른 $|xL|$ 에 비하여 주입 전류에 따른 단일 모드 수율의 감소가 작게 나타나 3배의 문턱 전류에서는 약 56%로 비교적 큰 수율을 나타냈다.

양 단면 반사율 조합이 AR-HR인 경우 CR과 AR 단면의 반사율이 문턱 전류 이상에서 단일 모드 수율과 파워 추출 효율에 미치는 영향이 문턱 전류에서의 경우보다 크게 나타났다. CR이 커질수록 공진기 내의 광자 분포가 균일하게 되어 IP CC DFB 레이저의 단일 모드 수율과 단일 모드 조건을 만족하는 모든 경우에 대한 파워 추출 효율이 커짐을 알 수 있었다. 3배의 문턱 전류에서 CR이 0인 경우 단일 모드 수율은 50%인 반면 CR이 1인 경우는 98%로 그 차이가 크게 발생하였다. 또한 AR 단면의 반사율이 작을수록 공진기 내의 광자가 중앙부근에 집중적으로 분포하는 현상이 완화되어 단일 모드 수율과 파워 추출 효율이 크게 나타났다. AR 단면 반사율이 0.1%인 경우 단일 모드 수율이 85%이었으나 5%인 경우는 45%로 약 40%가 감소하였다.

양 단면 반사율 조합이 AR-HR이고 CR이 0.2인 경우 CC DFB 레이저의 발진 파장은 AR 단면 반사율에 비해 상대적으로 HR 단면 반사율이 매우 커서 DFB 금지대역 내에 넓게 분포하였다. IP CC DFB 레이저의 경우 DFB 금지대역 내에서 장파장 모드 근처에 좀더 분포하였고, 반면에 AP CC DFB 레이저의 경우는 단파장 모드 근처에 좀더 분포하였다. CR이 커질수록 IP CC DFB 레이저의 경우 장파장 모드 근처에 발진 파장의 분포가 증가하였고 반면에 AP CC DFB 레이저의 경우는 단파장 모드 근처에 발진 파장의 분포가 증가하였다. $|xL|$ 이 커질수록 발진 파장이 존재하는 파장 폭이 작아지고 발진 파장 분포가 장파장 쪽으로 이동함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 숭실대학교 교내연구비 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

- [1] Nobuhiko Susa, "Fluctuations of the Laser Characteristics and the Effect of the Index-Coupling Component in the Gain-Coupled DFB Laser," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 33, no. 12, pp. 2255-2265, 1997.
- [2] K. David, G. Morthier, P. Vankwikelberge, Roel G. Baets, T. Wolf, and B. Borchert, "Gain-Coupled DFB lasers versus index-coupled and phase-shifted DFB lasers: A comparison based in spatial hole burning corrected yield," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 27, no. 6, pp. 1714-1723, 1991.
- [3] J. Hong, K. W. Leong, T. Makino, J. Evans, X. Li, and W. P. Huang, "Impact of Random Facet Phases on Modal Properties of Partly Gain-Coupled Distributed-Feedback Lasers," *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, vol. 3, no. 2, pp. 555-568, 1997.
- [4] A. Talneau, S. Slempekes, and A. Ougazzaden, "Accuracy on Emitted Wavelengths in DFB Laser Arrays Resulting from the Longitudinal Mode Selection Mechanism," *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, vol. 6, no. 1, pp. 191-196, 2000.
- [5] M. Funabashi, "High Power CW DFB Lasers and Modules for Externally Modulated WDM Sources," *OECC 2002*, 11C3-4, pp. 478-479, Yokohama, 2002.
- [6] Y. Nakano, Y. Uchida, and K. Tada, "Highly Efficient Single Longitudinal-Mode Oscillation Capability of Gain-Coupled Distributed Feedback Semiconductor Laser-Advantage of Asymmetric Facet Coating," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 4, no. 4, pp. 308-311, 1992.
- [7] S.-W. Ryu and J. Kim, "Monolithic Integration of Multi-wavelength Laser Array Associated with Asymmetric Sampled Grating Lasers," *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, vol. 1, pp. 1358-1365, 2002.

- [8] S. K. C. Liew, "Above-Threshold Analysis of Loss-Coupled DFB Lasers: Threshold Current and Power Efficiency," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 7, no. 12, pp. 1400-1402, 1995.
- [9] J. Chen, A. Champagne, R. Maciejko and T. Makino, "Improvement of Single-Mode Gain Margin in Gain-Coupled DFB Lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 33, no. 1, pp. 33-40, 1997.
- [10] S. Hansmann, K. Dahlhof, B. E. Kempf, R. Gobel, E. Kuphal, B. Hubner, H. Burkhard, A. Krost, K. Schatke, and D. Bimberg, "Properties of Loss-Coupled Distributed Feedback Laser Arrays for Wavelength Division Multiplexing Systems," *J. Lightwave Technol.*, vol. 15, no. 7, pp. 1191-1197, 1997.
- [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] J. Chen, A. Champagne, R. Maciejko and T. Makino, "Improvement of Single-Mode Gain Margin in Gain-Coupled DFB Lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 33, no. 1, pp. 33-40, 1997.
- [13] G. Morthier, P. Vankwikelberge, K. David, and R. Baets, "Improved Performance of AR-Coated DFB Lasers by the Introduction of Gain Coupling," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 2, no. 3, pp. 170-172, 1990.

Power extraction efficiency and lasing wavelength distribution of complex-coupled DFB lasers for various facet reflectivity combinations and coupling coefficient ratios

Sang-Taek Kim and Boo-Gyoun Kim[†]

School of Electronic Engineering, Soongsil University, Seoul, Korea

[†]*E-mail: bgkim@e.ssu.ac.kr*

(Received November 6, 2003, Revised manuscript April 8, 2004)

We have calculated the power extraction efficiency and the lasing wavelength distribution of complex-coupled(CC) DFB lasers above threshold for various $|\chi L|$ and facet reflectivity combinations, and we have compared the results with those at threshold. Also, we have investigated the effect of coupling coefficient ratio(CR) and the reflectivity of AR facet on the power extraction efficiency and the lasing wavelength distribution. At threshold, the single mode yield as a function of power extraction efficiency of in-phase(IP) CC DFB lasers is the same as that of anti-phase(AP) CC DFB lasers. Above threshold, however, the single mode yield as a function of power extraction efficiency of IP CC DFB lasers is much larger than that of AP CC DFB lasers. For IP CC DFB lasers, AR-HR combination has high single mode yield and large power extraction efficiency compared to other facet combinations. IP CC DFB laser with AR-HR combination for $|\chi L|$ of 0.8 has the highest single mode yield and largest power extraction efficiency above threshold among the cases considered. For AR-HR combination, as CR increases and the reflectivity of AR facet decreases, both single mode yield and power extraction efficiency increase due to the reduction of the spatial hole burning effect. For AR-HR combination, the lasing wavelength of CC DFB laser has distributed over the stopband of DFB. As CR increases, the lasing wavelength concentrates on the long wavelength side for IP CC DFB laser, while on the short wavelength side for AP CC DFB laser. As $|\chi L|$ increases, the width of the wavelength distribution decreases and the lasing wavelength moves to the long wavelength side.

OCIS Codes : 140.3490, 140.5960, 140.2020, 230.1480.