

문턱 전류 이상에서 Complex-Coupled DFB 레이저 다이오드의 여러 가지 결합 계수 비와 양 단면 반사율 조합에 따른 단일 모드 수율 해석

김부균[†] · 김상택 · 전재두

숭실대학교 정보통신전자공학부

☎ 156-743 서울시 동작구 상도5동 1-1

(2003년 4월 21일 받음, 2003년 9월 24일 수정본 받음)

Complex-coupled(CC) DFB 레이저의 경우 문턱 전류에서 spatial hole burning (SHB) 현상을 나타내는 f 계수를 고려하여 구한 단일 모드 수율과 문턱 전류 이상에서의 단일 모드 수율과의 연관성이 존재하지 않음을 알 수 있었다. 문턱 전류에서 f 계수를 고려하여 구한 in-phase (IP) CC DFB 레이저와 anti-phase (AP) CC DFB 레이저의 단일 모드 수율은 일치하였으나 문턱 전류 이상에서는 큰 차이를 보였다. 문턱 전류 이상에서 IP CC DFB 레이저의 단일 모드 수율은 결합 계수 비가 증가할수록 증가하였다. 반면에 AP CC DFB 레이저의 경우 결합 계수 비에 관계없이 주입 전류가 증가하면 단일 모드 수율은 급격히 감소함을 알 수 있었다. 양 단면 반사율 조합이 AR-HR인 경우 결합 세기가 작을수록 AR 단면의 반사율이 단일 모드 수율에 미치는 영향이 크게 나타났다. 결합 세기가 작을수록 단일 모드 수율의 증가율이 완만해지기 시작하는 결합 계수 비가 커졌고 또한 최대 단일 모드 수율이 증가하였다. 양 단면 반사율 조합이 AR-HR과 AR-AR의 경우가 AR-CL과 CL-CL인 경우에 비하여 단일 모드 수율이 크게 나타났다.

주제어 : complex-coupled DFB lasers, single mode yield, coupling coefficient ratio, facet reflectivity combinations.

I. 서 론

광통신 시스템에서 장거리 대용량 전송을 위해서는 출력 파장이 크고 선평이 좁고 안정된 단일 모드로 동작하는 광원이 필요하다. Index coupled(IC) DFB 레이저의 경우 두 모드간의 degeneracy 문제 때문에 단일 모드 수율이 작고 양 단면의 반사율과 격자 위상이 레이저 동작 특성에 미치는 영향이 크다는 단점을 가지고 있다. IC DFB 레이저에 비하여 complex coupled(CC) DFB 레이저는 단일 모드 수율이 크고, 선평이 넓고, 주파수 첩이 적고, 온도에 대한 영향이 작으며, 양 단면의 반사율과 격자 위상이 레이저 동작 특성에 미치는 영향이 작다는 많은 장점을 가지고 있다.^[1-3] Makino 그룹의 경우 양 단면 주파수를 주기적으로 식각한 CC DFB 레이저 대한 연구에 의하면 주파수를 향상시켰고 단일 모드 수율이 높고 넓은 온도 변화에 따른 단일 모드의 안정성이 향상됨을 보였다.^[3-5] IC DFB 레이저 구현을 위한 다른 방법으로 주기적인 손실 분포를 주는 방법,^[6] 주기적으로 전류를 차단시키는 방법^[7] 등이 있다.

대부분의 경우 CC DFB 레이저의 단일 모드 수율은 문턱 전류 이상에서 정규화된 이득 마진과 f 계수를 고려하여 계산되었다.^[1,2,8-10] 여기서 f 계수란 문턱 전류에서 spatial hole burning (SHB) 현상을 나타내는 계수로서 공진기 내에 존재하는 광자 밀도의 최대값과 최소값의 비이다. David 등은 문턱 전류에서 IC DFB 레이저와 CC DFB 레이저의 단일 모드 수율을 구

하였고 실험 결과와 비교하였다.^[2] Hong 등은 DFB 레이저의 양 단면 반사율과 격자 위상이 단일 모드 수율, 발진 파장, 문턱 전류, 부 모드 억제 비 등에 미치는 영향에 대하여 살펴 보았다.^[3] Susa는 문턱 전류에서 양 단면 반사율 조합에 따른 CC DFB 레이저의 단일 모드 수율과 발진 파장의 분포 등에 대하여 살펴보았다.^[11] Nakano는 문턱 전류에서 양 단면 반사율 조합에 대하여 CC DFB 레이저의 파워 추출 효율을 구하였다.^[11] 그 결과 양 단면 반사율이 AR-HR인 경우가 파워 추출 효율이 크고 단일 모드 수율이 큼을 보였다. Hansmann 등은 CC DFB 레이저에 대하여 문턱 전류에서 양 단면 반사율 조합에 따른 발진 파장 분포와 문턱 전류 이상에서 loss-coupling 계수에 따른 단일 모드 수율을 계산하였다.^[12]

주입 전류가 증가하면 레이저의 종축 방향으로의 불균일한 광자 밀도 분포에 의해 SHB 현상이 더욱 심하게 발생되어 단일 모드 수율이 감소한다. 본 논문에서는 CC DFB 레이저의 단일 모드 수율을 여러 가지 결합 계수 비와 양 단면 반사율 조합에 대하여 문턱 전류에서 f 계수를 고려하여 단일 모드 수율을 구하였고 그 결과를 문턱 전류 이상에서의 단일 모드 수율과 어떠한 연관성이 있는지에 대하여 검토하였다. 또한 결합 세기와 결합 계수 비에 따라 단일 모드 수율이 어떻게 달라지는지에 관하여 살펴보았다. 본 논문에서는 인덱스 회절 격자와 이득 회절 격자가 동 위상인 in-phase(IP) CC DFB 레이저와 인덱스 회절 격자와 이득 회절 격자의 위상이 180° 차이가 나는 anti-phase(AP) CC DFB 레이저에 대하여 단일 모드 수율을 계산하였다. 단면 반사율은 HR(high-reflection)은 90%, AR(anti-reflection)은 1%, CL(cleaved facet)은 32% 이

E-mail: bgkim@e.ssu.ac.kr

고 결합 세기 $k\kappa L$ 은 1.25, 2와 3이다. CC DFB 레이저의 단일 모드 수율을 해석하기 위하여 문턱 전류 이상에서는 SHB 효과를 고려하기 위하여 레이저를 종축 방향으로 여러 개의 섹션으로 분할하고 각 섹션에서는 소자 파라미터를 상수로 가정하여 계산하는 전달행렬방법을 사용하였다.^[13]

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 CC DFB 레이저의 특성 해석 방법 및 양 단면 격자 위상 조합에 대하여 단일 모드 발진 조건을 만족하는 수율 계산에 대하여 간략히 설명하였다. 3장에서는 문턱 전류에서 IP와 AP 회절 격자를 가지는 CC DFB 레이저에 대하여 f 계수를 고려하여 단일 모드 수율을 구하였고, 그 결과를 문턱 전류 이상에서 구한 단일 모드 수율 결과와의 연관성에 대하여 검토하였다. 또한 결합 세기와 결합 계수 비가 단일 모드 수율에 미치는 영향에 대하여 살펴보았다. 마지막으로 4장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

II. DFB 레이저의 단일 모드 수율 해석 방법

반도체 레이저의 특성 해석을 위해서는 공진기 내부의 전계 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 SHB 현상을 고려하기 위하여 전달행렬방법을 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.^[13]

그림 1은 해석에 사용된 양 단면 반사율과 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.^[14] 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 확률적으로 계산된다.

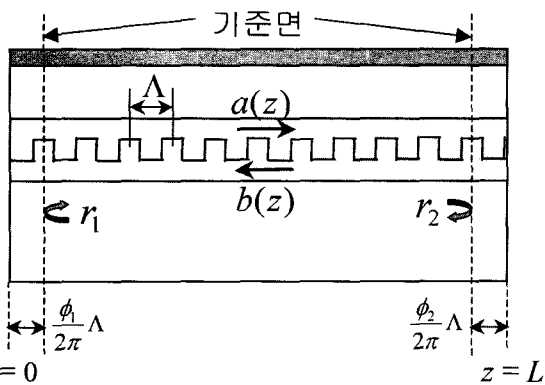


그림 1. 양 단면 반사율과 양 단면 격자 위상을 고려한 DFB laser의 개념도.

대부분의 경우 단일 모드 수율은 문턱 전류에서 정규화된 이득 마진과 SHB 현상을 나타내는 f 계수를 고려하여 계산하였다. 이러한 단일 모드 조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta\alpha L &> \Delta\alpha L_{SM} \\ f &\geq f_c \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $\Delta\alpha L_{SM}$ 은 단일 모드 발진에 필요한 정규화된 이득 마진을 나타내며 f 계수는 레이저 공진기 내에 존재하는 광자 밀도의 최대값과 최소값의 비로 다음 수식과 같이 표현될 수 있다.^[11]

$$f = \frac{S_{min}}{S_{max}} \quad (2)$$

여기서 S_{max} 와 S_{min} 은 각각 레이저 공진기 내에 존재하는 광자 밀도의 최대값과 최소값을 나타낸다. f 계수가 1이면 광자 밀도가 균일하여 SHB 현상이 발생하지 않음을 의미하고 0에 가까울수록 SHB 현상이 크게 발생됨을 의미한다.

식 (1)에서 f_c 는 단일 모드 발진을 위해 요구되는 최소의 f 값을 의미한다. 즉 단일 모드로 발진하기 위해서는 이득 마진이 0.1 이상이어야 하고 SHB 현상을 나타내는 f 계수가 주어진 값인 f_c 보다 커야한다. f 계수가 f_c 보다 작은 경우 이득 마진이 0.1 보다 크더라도 SHB 현상이 크게 일어나 단일 모드 수율 계산에서 제외된다. f_c 값은 DFB 구조와 양 단면의 반사율에 따라 달라지며 참고 문헌 [1]에서는 0.6, 참고 문헌 [8]에서는 0.4, 그리고 참고 문헌 [9]에서는 0.2를 사용하였다.

그러나 문턱 전류 이상에서 실제로 단일 모드로 발진하는 경우는 문턱 전류에서 단일 모드 조건인 식 (1)과 다르리라 예상된다. 특히 CC DFB 레이저에서는 회절 격자가 IP와 AP인 경우 문턱 전류 이상에서의 수율이 문턱 전류에서 식 (1)을 사용하여 구한 단일 모드 수율과 다르리라 예상된다. 따라서 다음 절에서는 문턱 전류 이상에서 CC DFB 레이저의 단일 모드 수율을 구하여 문턱 전류에서 식 (1)을 사용하여 구한 단일 모드 수율과 비교 검토하고 그 연관성에 대하여 살펴 보겠다.

단일 모드 수율 계산에 사용된 양 단면의 격자 위상의 전체

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	$2.5 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$	linear recombination coefficient
B	$10^{-16} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	bimolecular recombination coefficient
C	$3 \times 10^{-41} \text{ m}^6 \text{ s}^{-1}$	auger recombination coefficient
α_H	5	linewidth enhancement factor
N_0	$1.15 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$	transparency carrier density
Γ	0.35	confinement factor
α_0	$20 \times 10^2 \text{ m}^{-1}$	internal loss
g_N	$2.7 \times 10^{-20} \text{ m}^{-2}$	differential gain
λ_B	1.55 μm	bragg wavelength
ϵ	$5 \times 10^{-23} \text{ m}^3$	nonlinear gain suppression coefficient

문턱 전류는 16×16 으로 하였다. 계산에 사용된 파라미터는 표 1과 같다.

III. 단일 모드 수율

여러 가지 결합 계수 비, 양 단면 반사율 조합과 결합 세기 κ 에 대하여 CC DFB 레이저의 단일 모드 수율을 구하였다. 여기서 CC DFB 레이저의 결합 계수 비(Coupling coefficient ratio, CR)는 인텍스 결합 계수 (κ_i)와 이득 결합 계수 (κ_g)의 비인 κ_g/κ_i 로 정의된다. 또한 문턱 전류에서 식 (1)을 사용하여 구한 CC DFB 레이저의 단일 모드 수율과 문턱 전류 이상에서 주입 전류에 따른 단일 모드 수율과의 연관성에 대하여 검토하였다. CC DFB 레이저의 회절 격자가 IP와 AP인 경우에 대하여 단일 모드 수율을 구하여 서로 비교하였다.

문턱 전류 이상에서 단일 모드 수율을 계산하기 전에 본 논문에서 사용된 모델^[13]로 구한 단일 모드 수율과, 실험 결과와 비교한 해석적인 방법으로 구한 단일 모드 수율^[2]과 비교하였다. 그림 2는 문턱 전류에서 정규화된 이득 마진에 대하여 도출한 CC DFB 레이저의 단일 모드 수율을 나타내는 그림이다. 여기서 공진기의 길이는 $300 \mu\text{m}$ 이고 결합 계수는 $\kappa = (49 + j26.18) \text{cm}^{-1}$ 이며 양 단면 반사율은 3%이다. 본 논문에서 사용된 모델^[13]을 사용하여 구한 단일 모드 수율과 참고 문헌 [2]의 CC DFB 레이저의 수율 결과와 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 그림 2에서 단일 모드 조건을 $\Delta\alpha L > 0.1$ 과 $f \geq 0$ ($f_c = 0$ 으로 SHB 현상을 고려하지 않은 경우)인 경우로 가정하면 단일 모드 수율은 약 98%이다. 그러나 SHB 현상을 고려하여 단일 모드 조건을 $\Delta\alpha L > 0.1$ 과 $f \geq 0.4$ 인 경우로 가정하면 단일 모드 수율은 약 78%이다. 이것은 이득 마진이 0.1 보다 큰 모든 경우에서 SHB 현상이 크게 발생하는 경우, 즉 $f < 0.4$ 인 경우를 제외시켰을 때의 단일 모드 수율이다. 따라서 문턱 전류에서 단일 모드 수율 조건, $\Delta\alpha L > \Delta\alpha L_{SM}$ 과 $f \geq f_c$ 에서 f_c 가 커질수록 문턱 전류에서 단일 모드 수율은 그림 2와 같이 감소

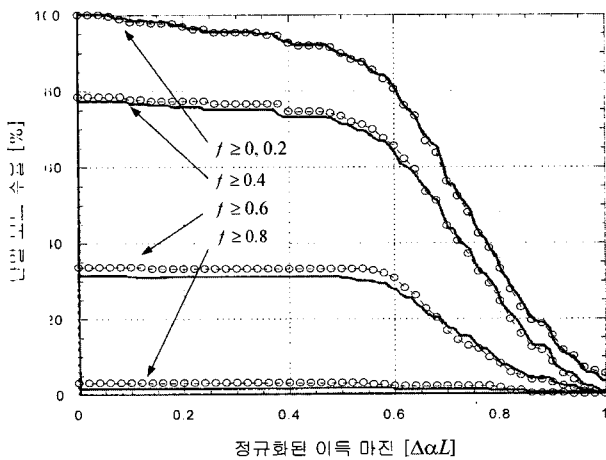


그림 2. 문턱 전류에서 정규화된 이득 마진에 대하여 도출한 CC DFB 레이저의 단일 모드 수율. $\kappa = (49 + j26.18) \text{cm}^{-1}$, $L = 300 \mu\text{m}$. — : 참고 문헌 [2]의 그림 9, ○ : 본 논문에서 사용한 모델^[13]로 구한 수율.

하게 되고 f_c 에 따라서 단일 모드 수율의 변화가 큼을 알 수 있다.

Gain grating 구조를 가지는 CC DFB 레이저의 경우 주입 전류가 증가하게 되면 SHB 현상에 의해 종축 방향으로 결합 계수 $\kappa_i + j\kappa_g$ 가 변하게 된다. AP grating 구조를 가지는 CC DFB 레이저의 경우 문턱 전류 이상에서 불안정한 동적 특성이 나타났다.^[15,16] 반면에 loss grating 구조를 가지는 CC DFB 레이저의 경우 주입 전류가 증가하게 되면 loss grating 층의 손실 포화 현상이 발생하여 결합 계수가 변화한다. If grating 구조를 가지는 CC DFB 레이저의 경우 낮은 주입 전류에서 self-pulsation 등과 같은 불안정한 동적 특성이 나타났다.^[17] 본 논문에서 문턱 전류 이상에서 단일 모드 수율의 해석은 위와 같은 동적 특성을 포함하지 않았으며 결합 계수는 상수로 가정하였다.

3.1. 양 단면 반사율 조합이 AR-HR인 CC DFB 레이저의 단일 모드 수율

그림 3은 양 단면 반사율 조합이 AR-HR이고 결합 세기 $|\kappa L|$ 이 1.25일 때 문턱 전류에서 여러 가지 CR에 대하여 f_c 의 함수로 도시한 IP CC DFB 레이저의 단일 모드 수율을 나타내는 그림이다. CR이 0인 경우는 IC DFB 레이저를 의미하며 CR이 1인 경우는 κ_g 가 κ_i 와 같음을 의미한다. f_c 값에 따라서 문턱 전류에서 단일 모드 수율이 급격히 변화함을 알 수 있다. 그림에서 CR이 0이고 f_c 가 0.4일 때 수율은 약 46%이었는데 이것은 전체 단면 격자의 위상 조합 수에 대하여 $\Delta\alpha L > 0.1$ 이고 $f \geq 0.4$ 인 양 단면 격자의 위상 조합 수의 비로 계산된 값이다. 즉 SHB 현상이 크게 발생하는 $f < 0.4$ 인 경우는 포함되지 않은 단일 모드 수율이다. 따라서 문턱 전류에서 단일 모드 조건 f_c 가 커질수록 단일 모드 수율이 감소함을 알 수 있다. 문턱 전류에서 CR 값에 따른 IP CC DFB 레이저의 단일 모드 수율은 CR 값이 커질수록 약간 증가하였다. AP CC DFB

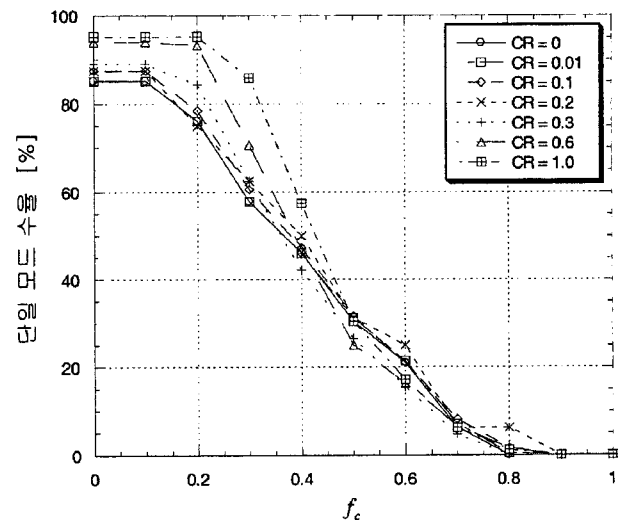


그림 3. 양 단면 반사율 조합이 AR-HR이고 $|\kappa L|$ 이 1.25일 때 문턱 전류에서 여러 가지 CR에 대하여 f_c 의 함수로 도시한 IP CC DFB 레이저의 단일 모드 수율.

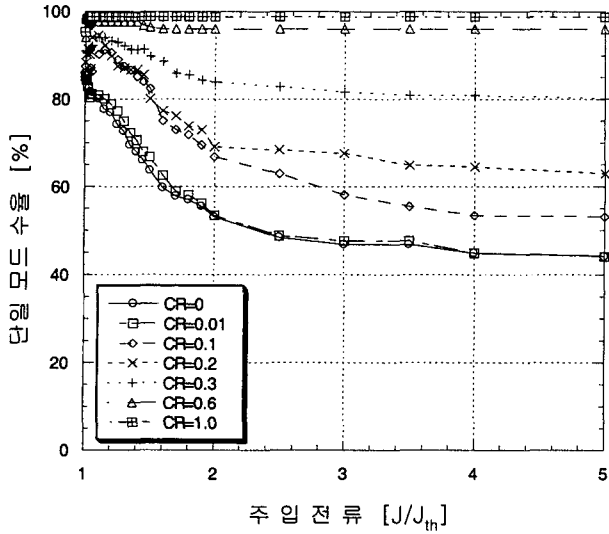


그림 4. $|\kappa L|$ 이 1.25일 때 여러 가지 CR 값에 대하여 주입 전류의 함수로 도시한 IP CC DFB 레이저의 단일 모드 수.

레이저의 경우 문턱 전류에서 여러 가지 CR에 대하여 f_c 의 함수로 도시한 단일 모드 수율은 예측한대로 그림 3의 IP CC DFB 레이저의 단일 모드 수율과 정확히 일치하였다.

그림 4는 그림 3과 같은 조건일 때 문턱 전류 이상에서 여러 가지 CR 값에 대하여 주입 전류의 함수로 도시한 IP CC DFB 레이저의 단일 모드 수율을 나타내는 그림이다. CR 값이 커지게 되면 (결합 계수 비가 커지게 되면) SHB 현상이 감소하게 되어 단일 모드 수율이 커짐을 알 수 있다.^[18] 그러나 복소 회절 격자가 생성되는 메카니즘이 loss coupling인 경우 CR 값이 커지게 되면 문턱 전류가 커지는 단점이 있어 CR 값을 적절하게 선택하여야 한다.^[19] CR 값이 0인 IC DFB 레이저의 경우 주입 전류가 증가하면 SHB 현상이 커지게 되어 단일 모드 수율이 문턱 전류 값보다 크게 감소함을 알 수 있다. CR 값이 0.3인 경우 문턱 전류 이상에서 80% 이상의 높은 단일 모드 수율이 유지되었다. CR 값이 0.3 보다 큰 경우에는 90% 이상의 높은 단일 모드 수율을 주입 전류에 관계없이 일정하게 유지함을 볼 수 있었다.

그림 5는 그림 4와 같은 조건일 때 여러 가지 CR 값에 대하여 주입 전류의 함수로 도시한 AP CC DFB 레이저의 단일 모드 수율을 나타내는 그림이다. 문턱 전류 이상에서는 IP CC DFB 레이저의 경우와 다르게 CR 값에 상관없이 주입 전류가 증가하면 단일 모드 수율이 급격하게 감소함을 볼 수 있었다. 문턱 전류 이상에서 AP CC DFB 레이저의 단일 모드 수율은 CR 값이 0인 IC DFB 레이저 보다 단일 모드 수율이 작았다.

이미 발표된 연구 결과들에서 문턱 전류 이상에서 단일 모드 수율을 문턱 전류에서 SHB 현상을 나타내는 f 계수를 고려한 단일 모드 수율로부터 예측할 수 있다고 가정하였다.^[1,2] 주입 전류에 따른 단일 모드 수율을 나타내는 그림 4와 5를 문턱 전류에서 f_c 의 함수로 구한 단일 모드 수율 그림 3과 비교하면 두 수율간의 연관성은 나타나지 않았다. 특히 문턱 전류에서 IP CC DFB 레이저와 AP CC DFB 레이저의 단

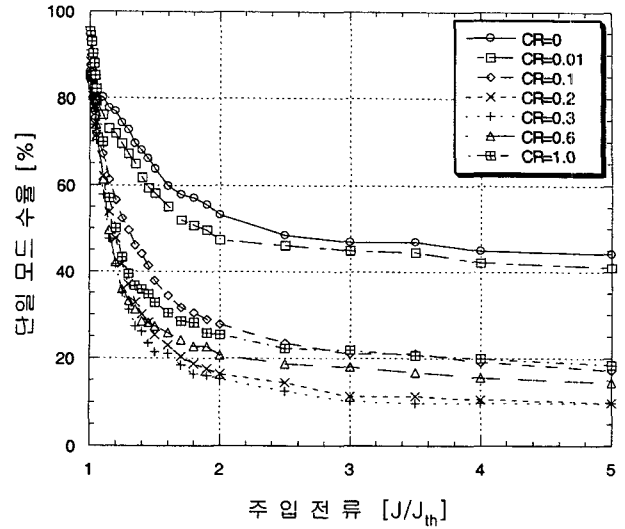


그림 5. $|\kappa L|$ 이 1.25일 때 여러 가지 CR 값에 대하여 주입 전류의 함수로 도시한 AP CC DFB 레이저의 단일 모드 수율.

일 모드 수율은 동일하였으나 주입 전류에 따른 단일 모드 수율은 그림 4와 5와 같이 크게 차이를 알 수 있다. 또한 그림 4의 IP CC DFB 레이저의 경우 CR 값에 따라서 단일 모드 수율이 크게 변화하였으나 그림 3의 f_c 의 함수로 구한 단일 모드 수율은 CR 값에 따라 크게 변화하지 않았다. 즉 그림 3의 문턱 전류에서 f_c 의 함수로 구한 단일 모드 수율로부터 문턱 전류 이상에서 주입 전류에 따른 단일 모드 수율을 예측할 수 없었다. 따라서 CC DFB 레이저의 경우 문턱 전류에서 SHB 현상을 나타내는 f 계수를 고려한 단일 모드 수율과 문턱 전류 이상에서 주입 전류에 따른 단일 모드 수율과의 연관성은 나타나지 않음을 알 수 있었다.

그림 6은 양 단면 반사율 조합이 AR-HR일 때 여러 가지 $|\kappa L|$ 에 대하여 주입 전류의 함수로 도시한 단일 모드 수율을 나타내는 그림이다. 그림 6(a)는 CR이 0.2인 CC DFB 레이저의 경우이고 그림 6(b)는 CR이 0인 IC DFB 레이저의 경우이다. 두 DFB 레이저의 단일 모드 수율을 비교하기 위해 $\Delta\alpha L > 0.3$ 으로 가정하였다. 그림 6(a)에서 IP CC DFB 레이저의 경우 결합 세기 $|\kappa L|$ 이 2와 3인 경우 주입 전류가 문턱 전류 보다 약간 커지게 되면 수율이 문턱 전류 수율에 비해 증가하나 그 후 더 증가하면 두 배의 문턱 전류 때까지는 급격히 감소하다가 그 이후에는 거의 변화가 없이 수율이 약 50% 이상을 유지함을 볼 수 있다. $|\kappa L|$ 이 1.25인 경우는 문턱 전류 이상에서 주입 전류를 증가 시켜도 수율이 거의 변화하지 않고 약 50% 이상을 유지함을 볼 수 있다. 반면에 AP CC DFB 레이저의 경우 $|\kappa L|$ 이 1.25, 2와 3 모두 주입 전류에 따른 단일 모드 수율이 급격하게 감소하였다. 그림 6(b)의 CR 값이 0인 IC DFB 레이저의 경우 $|\kappa L|$ 이 커질수록 문턱 전류 이상에서 단일 모드 수율은 급격하게 감소하였다. $|\kappa L|$ 이 3인 경우 문턱 전류에서 정규화된 이득 마진 0.3 이상인 경우가 존재하지 않아 단일 모드 수율이 존재하지 않음을 볼 수 있었다.

그림 7은 양 단면 반사율 조합이 AR-HR이고 주입 전류가 문턱 전류의 3배 일 때 여러 가지 $|\kappa L|$ 에 대하여 CR 값의

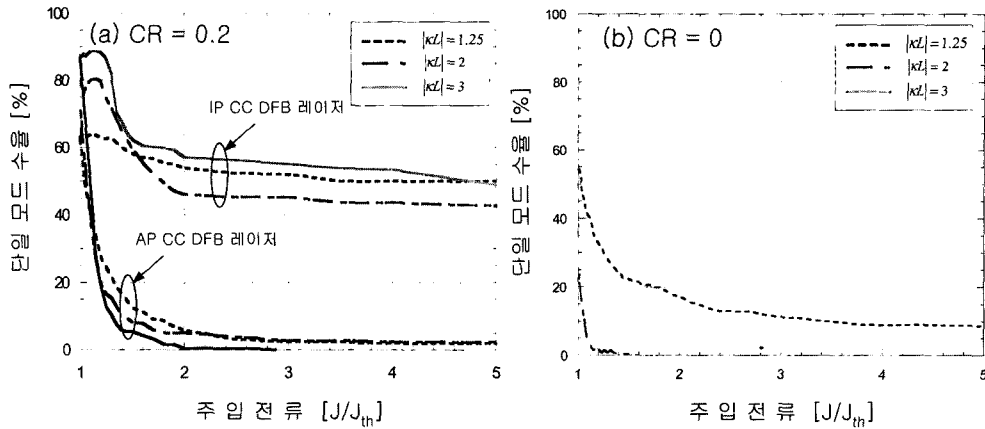


그림 6. 양 단면 반사를 조합이 AR-HR일 때 여러 가지 $|\kappa L|$ 에 대하여 주입 전류의 함수로 도시한 단일 모드 수율. (a) CR이 0.2인 CC DFB 레이저. (b) IC DFB 레이저 (CR=0).

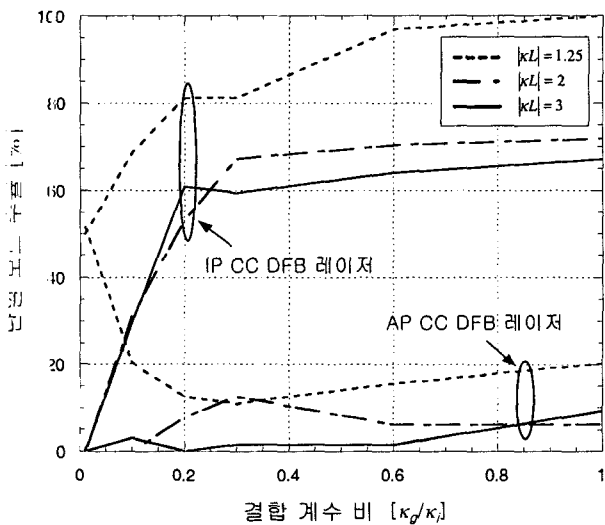


그림 7. 양 단면 반사를 조합이 AR-HR이고 주입 전류가 문턱 전류의 3배 일 때 여러 가지 $|\kappa L|$ 에 대하여 CR 값의 함수로 도시한 CC DFB 레이저의 단일 모드 수율.

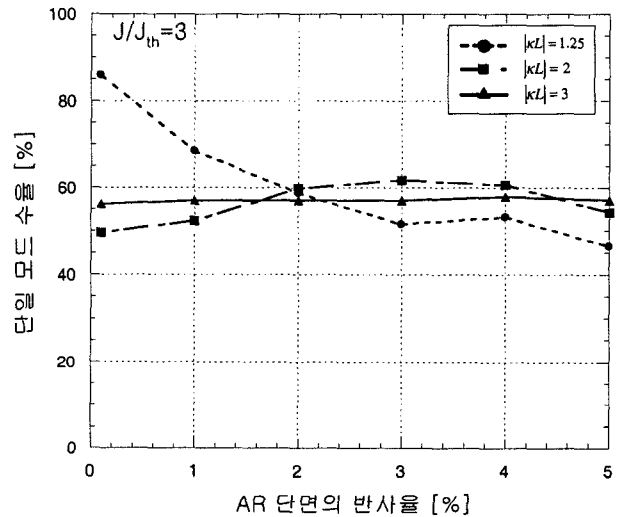


그림 8. 양 단면 반사를 조합이 AR-HR이고 CR이 0.2이며 주입 전류가 문턱 전류의 3배일 때 AR 단면의 단면 반사율 값에 따른 IP CC DFB 레이저의 단일 모드 수율.

함수로 도시한 CC DFB 레이저의 단일 모드 수율을 나타낸 그림이다. $|\kappa L|$ 이 1.25이고 CR 값이 0일 때 즉 IC DFB 레이저의 경우 3배의 문턱 전류에서 단일 모드 수율은 약 50% 정도였다. 그러나 CR 값이 증가함에 따라 IP CC DFB 레이저의 단일 모드 수율은 급격하게 증가함을 알 수 있다. 반면에 AP CC DFB 레이저의 경우 3배의 문턱 전류에서 단일 모드 수율은 매우 작았으며 $|\kappa L|$ 이 1.25인 경우에는 CR 값이 증가하여도 단일 모드 수율은 감소하였다. $|\kappa L|$ 이 2와 3인 경우에는 CR 값이 증가하면 약간 증가하였지만 크게 변화하지 않았다. IP CC DFB 레이저의 경우 결합 세기가 3인 경우는 CR 값이 0.2 까지, 결합 세기가 2인 경우는 CR 값이 0.3 까지, 결합 세기가 1.25인 경우는 CR 값이 0.6 까지 단일 모드 수율이 급격하게 증가하였고 그 이상에서는 완만하게 증가하면서 포화되었다. 즉 결합 세기가 작을수록 단일 모드 수율의 증가율이 완만해지기 시작하는 CR 값이 커졌고 또한 최대 수율이 증가함을 볼 수 있었다.

그림 8은 양 단면 반사를 조합이 AR-HR이고 주입 전류가 문턱 전류의 3배일 때 AR 단면의 반사율 값에 대하여 도시한 IP CC DFB 레이저의 단일 모드 수율을 나타내는 그림이다. 결합 세기 $|\kappa L|$ 이 1.25일 때가 2와 3에 비하여 AR 단면의 반사율에 대한 영향을 크게 받아 AR 단면의 반사율이 커질수록 단일 모드 수율이 감소하였다. AR 단면의 반사율이 0.1%인 경우는 단일 모드 수율이 약 86%이었으나 AR 단면의 반사율이 5%인 경우는 46%로 크게 감소하였다. 반면에 결합 세기가 3인 경우는 결합 세기가 커 AR 단면의 반사율의 영향이 거의 없어 AR 단면의 반사율에 따른 단일 모드 수율의 변화가 매우 작았다. 결합 세기가 2인 경우는 결합 세기가 3인 경우에 비하여 AR 단면의 반사율의 영향이 커 AR 단면의 반사율에 따른 단일 모드 수율의 변화가 결합 세기가 3인 경우에 비하여 약간 큼을 볼 수 있었다. 즉 결합 세기가 작아질수록 AR 단면의 반사율의 영향이 커 AR 단면의 반사율에 따른 단일 모드 수율의 변화가 큼을 볼 수 있었다.

3.2. 양 단면 반사율 조합이 AR-AR인 CC DFB 레이저의 단일 모드 수율

그림 9는 양 단면 반사율 조합이 AR-AR이고 결합 세기 $|kz|$ 이 1.25일 때 문턱 전류에서 여러 가지 CR 값에 대하여 f_c 의 함수로 도시한 IP CC DFB 레이저의 단일 모드 수율을 나타내는 그림이다. CR 값이 증가할수록 단일 모드 수율이 증가하였다. 이것은 IP CC DFB 레이저에서 CR 값이 증가할수록 SHB 현상이 감소되어 단일 모드 수율이 증가하기 때문이라 생각된다.^[15] 양 단면 반사율 조합이 AR-AR인 AP CC DFB 레이저의 경우 문턱 전류에서 f_c 계수를 고려한 단일 모드 수율은 예상대로 그림 9의 IP CC DFB 레이저의 단일 모드 수율과 일치하였다.

그림 10은 그림 9와 같은 조건에서 여러 가지 CR 값에 대

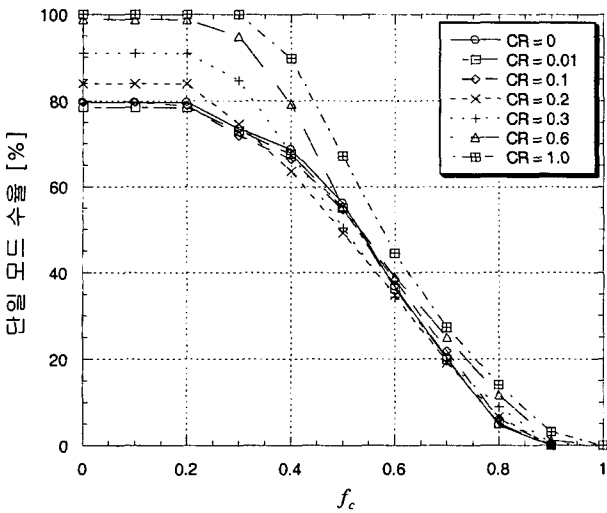


그림 9. 양 단면 반사율 조합이 AR-AR이고 $|kz|$ 이 1.25일 때 문턱 전류에서 여러 가지 CR 값에 대하여 f_c 의 함수로 도시한 IP CC DFB 레이저의 단일 모드 수율.

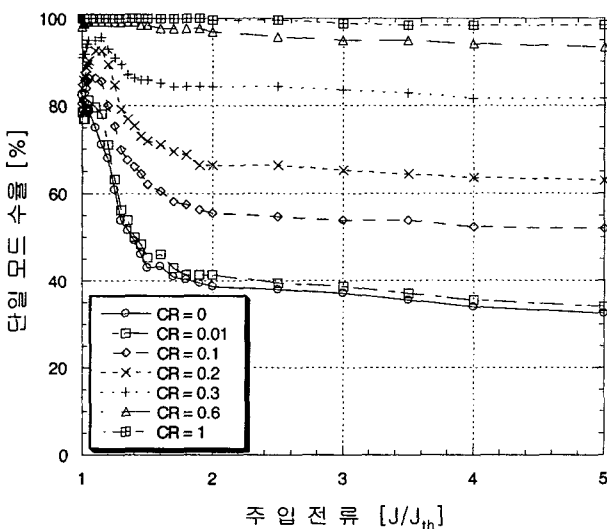


그림 10. 양 단면 반사율 조합이 AR-AR이고 $|kz|$ 이 1.25일 때 문턱 전류 이상에서 여러 가지 CR 값에 대하여 주입 전류의 함수로 도시한 IP CC DFB 레이저의 단일 모드 수율.

하여 문턱 전류 이상에서 주입 전류의 함수로 도시한 IP CC DFB 레이저의 단일 모드 수율을 나타내는 그림이다. CR 값이 증가할수록 문턱 전류 이상에서의 단일 모드 수율은 증가하였다. CR 값이 작을수록 주입 전류에 따른 단일 모드 수율의 감소는 크게 발생하였고 CR 값이 0.6과 1인 경우는 주입 전류에 관계없이 문턱 전류에서의 단일 모드 수율로 유지함을 볼 수 있다. CR 값이 0.3인 경우 문턱 전류 이상에서의 단일 모드 수율은 주입 전류가 문턱 전류의 두 배가 될 때까지는 수율이 감소하였으나 그 이후는 수율이 약 83%로 일정하게 유지함을 볼 수 있었다.

그림 11은 그림 9와 같은 조건에서 여러 가지 CR 값에 대하여 문턱 전류 이상에서 주입 전류의 함수로 도시한 AP CC DFB 레이저의 단일 모드 수율을 나타내는 그림이다. IP CC DFB 레이저의 경우와는 다르게 AP CC DFB 레이저의 경우 CR 값에 상관없이 주입 전류에 따른 단일 모드 수율은 급격하게 감소하였다.

양 단면 반사율 조합이 AR-AR인 경우도, 3.1절에서 논의한 양 단면 반사율 조합이 AR-HR인 경우와 마찬가지로, 문턱 전류 이상에서 단일 모드 수율과 (그림 10과 11) 문턱 전류에서 SHB 현상을 나타내는 f_c 계수를 고려한 단일 모드 수율과의 (그림 9) 연관성은 나타나지 않았다. 특히 문턱 전류에서 IP CC DFB 레이저와 AP CC DFB 레이저의 단일 모드 수율은 동일하였으나 주입 전류에 따른 단일 모드 수율은 그림 10과 11과 같이 크게 차이를 알 수 있다. 따라서 CC DFB 레이저의 경우 문턱 전류에서 SHB 현상을 나타내는 f_c 계수를 고려한 단일 모드 수율과 문턱 전류 이상에서의 단일 모드 수율과의 연관성은 없음을 알 수 있다.

그림 12는 양 단면 반사율 조합이 CL-CL이고 $|kz|$ 이 1.25일 때 문턱 전류에서 여러 가지 CR 값에 대하여 f_c 의 함수로 도시한 IP CC DFB 레이저의 단일 모드 수율을 나타내는 그림이다. CR 값이 증가하면 단일 모드 수율이 증가하였고 이

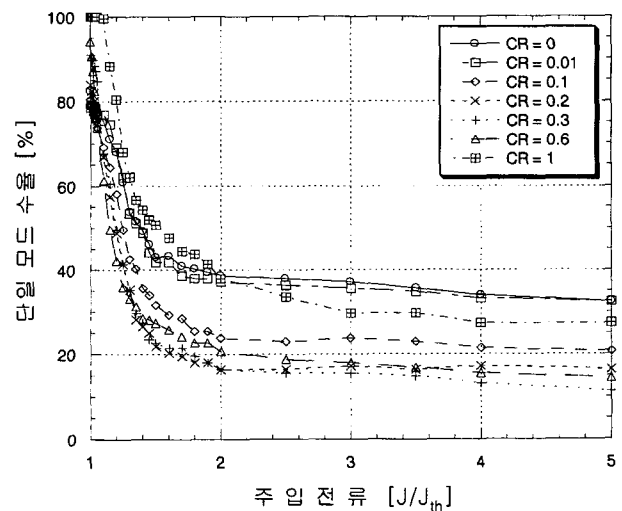


그림 11. 양 단면 반사율 조합이 AR-AR이고 $|kz|$ 이 1.25일 때 문턱 전류 이상에서 여러 가지 CR 값에 대하여 주입 전류의 함수로 도시한 AP CC DFB 레이저의 단일 모드 수율.

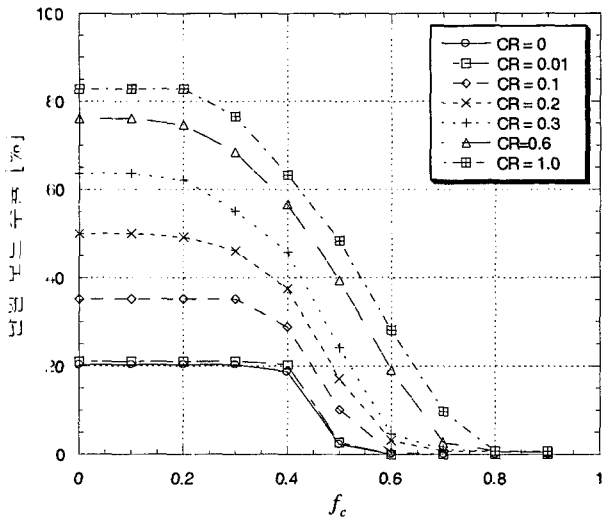


그림 12. 양 단면 반사율 조합이 CL-CL이고 $|k_L|$ 이 1.25일 때 문턱 전류에서 여러 가지 CR 값에 대하여 f_c 의 함수로 도시한 IP CC DFB 레이저의 단일 모드 수율.

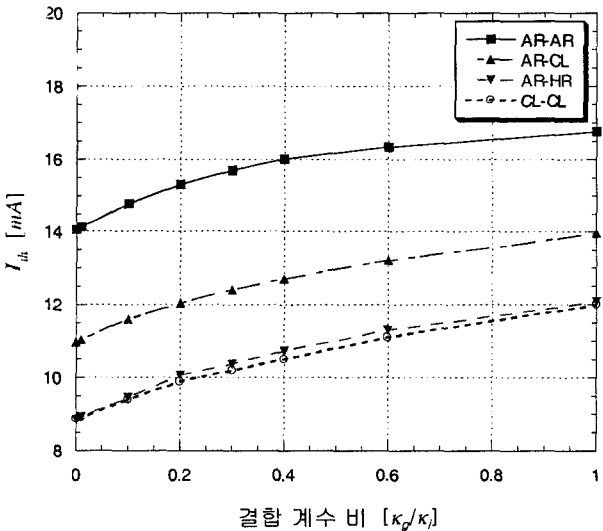


그림 13. $|k_L|$ 이 1.25일 때 여러 가지 양 단면 반사율 조합에 대하여 결합 계수 비에 따른 CC DFB 레이저의 문턱 전류.

은 양 단면 반사율 조합이 AR-HR과 AR-AR인 경우와 비슷한 경향을 나타냈다. 그러나 단일 모드 수율은 AR-HR과 AR-AR인 경우에 비해 작았다. 문턱 전류 이상에서 단일 모드 수율은 AR-HR과 AR-AR과 비슷한 경향을 나타냈으나 단일 모드 수율은 다른 반사율 조합에 비해 작게 나타났다. 양 단면 반사율 조합이 AR-CL의 경우도 다른 반사율 조합과 비슷한 경향을 보였고 CL-CL의 경우보다는 단일 모드 수율이 크

나타났다. 그림 13은 $|k_L|$ 이 1.25일 때 여러 가지 양 단면 반사율 조합에 대하여 결합 계수 비에 따른 CC DFB 레이저의 문턱 전류를 나타내는 그림이다. 복소 회절 격자를 생성하는 메카니즘이 loss coupling인 경우 회절 격자의 duty비에 따라 문턱 전류가 변화하는데 최소의 문턱 전류를 나타내는 최적의 duty 비는 약 0.15이다.^[20] 그림 13은 회절 격자의 duty 비를

0.15로 가정하고 구한 문턱 전류로서 CR 값이 증가하면 문턱 전류가 증가함을 알 수 있다. 예상대로 양 단면 반사율 조합이 AR-AR인 경우가 문턱 전류가 가장 컸다. 양 단면 반사율 조합이 AR-HR과 CL-CL인 경우는 문턱 전류가 거의 비슷하였다. 양 단면 반사율 조합이 AR-HR일 때 CR 값이 0.2인 경우 CR 값이 0인 IC DFB 레이저에 비해 14%, CR 값이 1인 경우는 36% 정도 문턱 전류가 증가하였다. 반면에 양 단면 반사율 조합이 AR-AR일 때 CR 값이 0.2인 경우 CR 값이 0인 IC DFB 레이저에 비해 9%, CR 값이 1인 경우는 19% 정도 문턱 전류가 증가하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 CC DFB 레이저의 여러 가지 결합 계수 비와 양 단면 반사율 조합에 대하여 문턱 전류에서 f_c 계수를 고려하여 단일 모드 수율을 구하였고 그 결과를 문턱 전류 이상에서 주입 전류에 따른 단일 모드 수율과 어떠한 연관성이 있는지에 대하여 살펴보았다. 문턱 전류 이상에서 IP CC DFB 레이저와 AP CC DFB 레이저의 단일 모드 수율을 구하였고 그 결과를 서로 비교하였다. 또한 결합 세기와 결합 계수 비에 따라 단일 모드 수율이 어떻게 달라지는지 살펴보았다.

IP CC DFB 레이저와 AP CC DFB 레이저의 단일 모드 수율은 문턱 전류에서는 일치하였으나 문턱 전류 이상에서는 큰 차이를 보였다. 문턱 전류 이상에서 주입 전류의 함수로 구한 IP CC DFB 레이저의 단일 모드 수율은 CR 값이 증가할수록 단일 모드 수율이 증가하였다. 반면에 AP CC DFB 레이저의 경우 CR 값에 관계없이 주입 전류가 증가하면 단일 모드 수율은 급격히 감소함을 알 수 있었다. 즉, CC DFB 레이저의 경우 문턱 전류에서 f_c 계수를 고려하여 구한 단일 모드 수율과 문턱 전류 이상에서의 단일 모드 수율과의 연관성이 나타나지 않음을 알 수 있었다. 따라서 문턱 전류에서 f_c 계수를 고려하여 구한 단일 모드 수율로부터 실제 문턱 전류 이상에서 단일 모드 수율을 예측하는 것은 거의 불가능하였다.

양 단면 반사율 조합이 AR-HR이고 CR 값이 0.2일 때 CC DFB 레이저는 IC DFB 레이저와는 다르게 $|k_L|$ 이 1.25와 3 모두 단일 모드 수율이 컸다. 주입 전류가 문턱 전류의 3 배에서 CR 값의 함수로 도시한 단일 모드 수율은 IP CC DFB 레이저의 경우 CR 값이 증가할수록 단일 모드 수율이 증가하였다. 반면에 AP CC DFB 레이저의 경우 단일 모드 수율의 변화가 크게 발생되지 않았다. 결합 세기가 작을수록 IP CC DFB 레이저의 단일 모드 수율의 증가율이 완만해지기 시작하는 CR 값이 커졌고 또한 최대 단일 모드 수율이 증가하였다. 양 단면 반사율 조합이 AR-HR인 경우 AR 단면 반사율이 단일 모드 수율에 미치는 영향은 예상대로 결합 세기가 작을수록 크게 나타났다.

양 단면 반사율 조합이 AR-HR과 AR-AR의 경우가 AR-CL과 CL-CL인 경우에 비하여 단일 모드 수율이 크게 나타났다. 그러나 양 단면 반사율 조합이 AR-HR인 경우가 양 단면 반사율의 비대칭성에 의하여 파워 추출 효율이 가장 크리

AR-AR인 경우가 가장 컸고 AR-HR과 CL-CL인 경우는 거의 비슷하였다.

감사의 글

본 연구는 2003년도 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 verse 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] T. Makino, "Side-mode suppression mechanism of gain-coupled DFB lasers with periodically etched quantum wells," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 8, pp. 602-604, 1996.
- [5] H. Lu, C. Blaauw, B. Benyon, G. P. Li, and T. Makino, "High power and high speed performance of 1.3 μm strained MQW gain-coupled DFB lasers," *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, vol. 1, pp. 375-380, 1995.
- [6] Y. Nakano, Y. Luo, and K. Tada, "Facet reflection independent, single longitudinal mode oscillation in a GaAlAs/GaAs distributed feedback laser equipped with a gain-coupled mechanism," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 55, pp. 1606-1608, 1989.
- [7] C. Kazmierski, D. Robein, D. Mathoorasing, A. Ougazzaden, and M. Filoche, "1.55 μm DFB lasers with new current-induced gain grating," *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, vol. 1, pp. 371-374, 1995.
- [8] K.-Y. Kwon, "Effect of Grating Phase Difference on Single-Mode Yield in Complex-Coupled DFB Lasers with Gain and Index Gratings," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 32, no. 11, pp. 1937-1949, 1996.
- [9] J.-I. Kinoshita and K. Matsumoto, "Yield Analysis of SLM DFB Lasers with an Axially-Flattened Internal Field," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 25, no. 6, pp. 1324-1332, 1989.
- [10] Peter P. G. Mols, P. I. Kuindersma, W. V. Es-spiekman, and Ingrid A. F. Baele, "Yield and Device Characteristics of DFB Lasers: Statistics and Novel Coating Design in Theory and Experiment," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 25, no. 6, pp. 1303-1313, 1989.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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 and Optical Technology Letters*, vol. 27, no. 6, pp. 396-400, 2000.
- [14] B.-G. Kim, S.-C. Cho, and A. Shakouri, "The Symmetry of the Amplified Spontaneous Emission Spectrum in Complex-Coupled DFB Lasers," *J. Lightwave Technol.*, vol. 16, no. 6, pp. 1088-1094, 1998.
- [15] 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.
- [16] A. J. Lowery, B. Jonsson, H. Olesen, and D. Novak, "Mode instabilities in complex-coupled DFB semiconductor lasers," *Electron. Lett.*, vol. 31, pp. 40-41, 1995.
- [17] J. Zoz and B. Borchert, "Dynamic behaviour of complex-coupled DFB lasers with in-phase absorptive grating," *Electron. Lett.*, vol. 30, pp. 39-40, 1995.
- [18] 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.
- [19] K. David, J. Buus, G. Morthier, and R. Baets, "Coupling coefficients in gain-coupled DFB laser: Inherent compromise between coupling strength and loss," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 3, no. 5, pp. 439-441, 1991.
- [20] H. L. Cao, Y. Luo, Y. Nakano, K. Tada, M. Dobashi, and H. Hosomatsu, "Optimization of Grating Duty Factor in Gain-Coupled DFB Lasers with Absorptive Grating-Analysis and Fabrication," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 4, no. 10, pp. 1099-1102, 1992.

Single mode yield analysis of complex-coupled DFB lasers above threshold for various coupling coefficient ratios and facet reflectivity combinations

Boo-Gyoun Kim[†], Sang-Taek Kim and Jae-Doo Jun

School of Electronic Engineering, Soongsil University, Seoul, KOREA

[†]*E-mail: bgkim@e.ssu.ac.kr*

(Received April 21, 2003, Revised manuscript September 24, 2003)

For complex-coupled (CC) DFB lasers, we found that there might be little correlation between the single mode yields at threshold and above threshold. At threshold, the single mode yield considering f number of in-phase (IP) CC DFB lasers is the same as that of anti-phase (AP) CC DFB lasers. However, the single mode yield as a function of injection current above threshold of IP CC DFB lasers is much different from that of AP CC DFB lasers. In the case of IP CC DFB lasers, the single mode yield increases as the coupling coefficient ratio (CR) increases, while, in the case of AP CC DFB lasers, the single mode yield decreases rapidly regardless of CR as the injection current increases. In the case of AR-HR combinations, the effect of AR reflectivity on the single mode yield increases as the coupling strength decreases. As the coupling strength decreases, the CR at which the increase rate of the single mode yield starts to decrease, increases, and the maximum single mode yield increases. Single mode yields of AR-HR and AR-AR combinations are larger than those of AR-CL and CL-CL combinations.

OCIS Codes : 140.3490, 140.5960, 140.3490, 140.2020.