

Index-coupled DFB 레이저의 여러 가지 양 단면 반사율 조합에 따른 문턱 전류 이상에서 단일 모드 수율 해석

김상택 · 전재두 · 김부균†

숭실대학교 정보통신전자공학부

Ⓣ 156-743 서울시 동작구 상도 5동 1-1

(2003년 2월 21일 받음, 2003년 5월 6일 수정본 받음)

Index-coupled(IC) DFB 레이저에서 여러 가지 κL 과 양 단면 반사율 조합에 대하여 문턱 전류 이상에서 주입 전류에 따른 단일 모드 수율을 구하였고 그 결과를 문턱 전류에서 f number에 따른 단일 모드 수율과의 관련성에 대하여 검토하였다. 그 결과 문턱 전류 이상에서 단일 모드 수율과 문턱 전류에서 f number에 따른 단일 모드 수율과의 관련성이 매우 적음을 알 수 있었다. 문턱 전류 이상에서 κL 이 0.8과 1.25인 경우가 κL 이 2와 3인 경우에 비하여 SHB 현상이 작아 단일 모드 수율이 큼을 알 수 있었다. 또한 양 단면 반사율 조합이 AR-HR과 AR-CL에 대하여 AR 단면의 반사율이 단일 모드 수율에 미치는 영향에 대하여 살펴보았다. 양 단면 반사율 조합이 AR-HR인 경우 AR 단면의 반사율이 작을수록 단일 모드 수율은 크게 나타났다. 반면에 AR-CL의 경우 최대의 단일 모드 수율을 나타내는 최적의 AR 단면의 반사율이 존재하였다. 본 논문에서 수행한 IC DFB 레이저의 단일 모드 수율 계산에서는 κL 이 0.8이고 양 단면 반사율 조합이 AR(1%)-HR인 경우가 문턱 전류 이상에서 단일 모드 수율이 가장 컸다.

주제어 : IC DFB Lasers, single mode yield.

I. 서 론

WDM 시스템에서 장거리 대용량 전송을 위해서는 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. 따라서 DFB 레이저의 특성 해석 및 단일 모드 수율 등에 관한 연구가 많이 행하여져 왔다.^[1-6]

대부분의 경우 DFB 레이저의 단일 모드 수율은 문턱 전류에서 spatial hole burning(SHB) 현상을 나타낸다고 생각되어지는 f number의 함수로 계산되었다.^[1-5] David 등은 레이저 공진기 내에 존재하는 광자 밀도의 최대값과 최소값의 비인 f number를 고려하여 index coupled(IC) DFB 레이저에 대하여 문턱 전류에서 단일 모드 수율을 구하여 실험적으로 구한 단일 모드 수율과 비교하였다.^[3] Nakano 등은 문턱 전류에서 양 단면 반사율 조합에 대하여 IC DFB 레이저와 GC DFB 레이저의 파워 추출 효율을 구하였다.^[7] 파워 추출 효율은 전체 출력 파워에 대한 한쪽 단면의 출력 파워의 비이다. 그 결과 양 단면의 반사율 조합이 AR-HR인 경우가 파워 추출 효율을 크게 하고 단일 모드 수율을 높일 수 있었다.

문턱 전류 이상에서 주입 전류가 증가하게 되면 레이저의 종축 방향으로의 불균일한 광자 밀도 분포에 의해 SHB 현상이 더욱 심하게 발생되어 이득 마진이 감소하게 된다.^[8,9] 따라서 문턱 전류 이상에서 DFB 레이저의 단일 모드 수율이 감소하게 된다. 문턱 전류 이상에서의 해석으로 Hansmann 등

의 경우는 loss-coupled(LC) DFB 레이저에 대하여 문턱 전류에서 양 단면 반사율 조합에 따른 발진 파장 분포와 문턱 전류 이상에서 loss-coupling 계수에 따른 단일 모드 수율을 계산하였다.^[10] Hong 등은 gain-coupled(GC) DFB 레이저에 대하여 문턱 전류에서 양 단면의 격자 위상이 발진 파장, 문턱 이득, 정규화된 이득 마진 등에 미치는 영향과 양 단면 출력 파워 비와 정규화된 이득 차이와의 관계를 검토하였고 문턱 전류 이상에서의 결과와 비교하였다.^[11]

그러나 양 단면 반사율 조합에 따른 문턱 전류에서 SHB 현상을 나타내는 f number를 고려하여 구한 단일 모드 수율이 실제 문턱 전류 이상에서의 단일 모드 수율과 어떠한 연관성이 있는지에 관해서는 명확히 검토되지 않았다. 또한 양 단면 반사율 조합이 주입 전류에 따른 단일 모드 수율에 미치는 영향에 관하여 체계적인 연구가 이루어지지 않았다.

본 논문에서는 양 단면 반사율 조합이 AR-HR과 AR-CL에 대하여 주입 전류에 따른 IC DFB 레이저의 단일 모드 수율을 구하였고 이를 문턱 전류에서 f number에 따른 단일 모드 수율과 어떠한 연관성이 존재하는지에 대하여 살펴보았다. 또한 AR 단면의 반사율이 주입 전류에 따른 단일 모드 수율에 미치는 영향에 대하여 살펴보았다. 여기서 CL(cleaved facet)은 32%, HR(high-reflection)은 90%, 그리고 AR(anti-reflection)은 0.1%에서 5%까지 고려하였고 계산에 사용된 결합 세기 κL 은 0.8, 1.25, 2와 3이다. 계산 방법으로는 문턱 전류 이상에서의 SHB 효과를 고려하기 위하여 레이저를 종축 방향으로 여러 개의 섹션으로 분할하고 각 섹션에서는 소자 파라미터를 상수로 가정하여 계산하는 전달행렬방법^[12]을 사용하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 문턱 전류 이상

†E-mail: bgkim@e.ssu.ac.kr

에서의 DFB 레이저 해석 방법 및 양 단면 격자 위상 조합에 대하여 단일 모드 발진 조건을 만족하는 수율 계산에 대하여 간략히 설명하였다. 3장에서는 여러 가지 결합 세기와 양 단면 반사율 조합에 대하여 주입 전류에 따른 단일 모드 수율을 구하여 그 결과를 문턱 전류에서 f number를 고려한 단일 모드 수율과의 연관성에 대하여 검토하였다. 또한 AR 단면의 반사율이 단일 모드 수율에 미치는 영향에 대하여 살펴보았다. 마지막으로 4장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

II. DFB 레이저 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. 문턱 전류에서는 유도 방출이 발생하지 않으므로 캐리어와 광자간의 관계를 나타내는 비율 방정식 없이 결합모드 방정식만으로 해석이 가능하다. 문턱 전류에서의 반도체 레이저의 해석은 입력이 없을 때 출력이 생기는 발진 조건으로부터 각 모드의 이득(α_m)과 발진 파장(δ_m)을 구할 수 있다.

문턱 전류 이상에서는 유도 방출이 발생하고 그에 따라 캐리어와 광자의 관계가 고려되어야 한다. 이러한 관계를 나타 내주는 방정식이 비율 방정식이다. 따라서 문턱 전류 이상에는 비율 방정식과 결합모드 방정식을 동시에 풀어야 하는데 불규칙한 광자 분포를 고려한 해석적인 해를 구할 수가 없기 때문에 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 해를 구한다. 문턱 전류에서 구한 모드 이득(α_m)과 파장(δ_m)을 초기치로 사용하여 결합모드 방정식과 비율 방정식을 동시에 만족하는 self consistent한 해를 구한다.

그림 1은 해석에 사용된 양 단면 반사 계수와 격자 위상을 고려한 DFB 레이저의 개념도이다. 순방향과 역방향으로 진행 하는 정규화된 필드 크기 $a(z)$ 와 $b(z)$ 는 다음과 같은 결합모드 방정식을 만족한다.¹²⁾

$$\begin{aligned} \frac{da(z)}{dz} - (g - \alpha_0 - j\delta)a(z) &= -j\kappa_{ab}b(z) \\ \frac{db(z)}{dz} + (g - \alpha_0 - j\delta)b(z) &= j\kappa_{ba}a(z) \end{aligned} \quad (1)$$

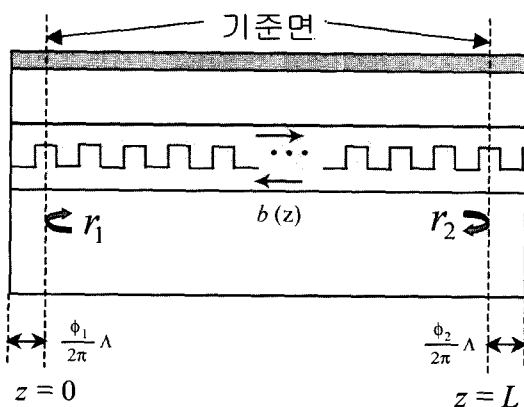


그림 1. 양 단면 반사 계수와 격자 위상을 고려한 DFB laser의 개념도.

여기서 g 는 필드 이득이고 α_0 는 필드 손실이며 δ 는 브래그 파장으로부터 벗어남을 나타내는 인자(detuning factor)이다. κ_{ab} (κ_{ba})는 역방향 필드(순방향 필드)가 순방향 필드(역방향 필드)와 결합하는 정도를 나타내는 결합 계수이다. IC DFB 레이저인 경우 $\kappa_{ab} = \kappa_{ba}^*$ 이다.

문턱 전류 이상에서는 유도 방출이 발생하고 그에 따른 광자 밀도와 캐리어 밀도의 관계는 다음과 같은 비율 방정식으로 주어진다.

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

여기서 $N(z)$ 는 캐리어 밀도이고 $S(z)$ 는 광자 밀도로 정규화된 필드 크기 $a(z)$ 와 $b(z)$ 로부터 구할 수 있다. 나머지 파라미터는 표 1에 나타나 있다.

그림 1과 같은 양 단면의 반사율 계수와 격자 위상을 포함한 경계조건은 다음과 같이 표현된다.

$$a(0) = r_1 b(0), \quad b(L) = r_2 a(L) \quad (3)$$

여기서 r_1 과 r_2 는 양 단면 격자 위상을 포함한 반사 계수를 의미하며 $r_1 = r_{10} e^{-j\phi_1}$ 과 $r_2 = r_{20} e^{-j\phi_2}$ 이다. r_{10} 와 r_{20} 는 각각 그림 1에서 왼쪽 단면과 오른쪽 단면에서의 반사 계수이고 ϕ_1 과 ϕ_2 는 기준면으로부터 양 단면까지의 격자 위상을 의미한다. 문턱 전류 이상에서 종축 방향으로의 불균일한 광자 밀도 분포로 인하여 캐리어 밀도의 SHB 현상이 발생한다. 이러한 SHB 현상을 고려하기 위하여 본 논문에서는 전달 행렬 방법을 사용하였다. 전달 행렬 방법은 레이저를 종축 방향으로 N개의 작은 섹션으로 나누어 각 섹션에서는 소자 파라미터를 상수로 가정하여 결합모드 방정식의 해를 행렬 형태로 구현한 방법이다. 전달 행렬 방법은 종축 방향으로 변화하는 캐리어 밀도뿐만 아니라 광자 밀도 분포와 굴절률 분포 등을 고려할 수 있다.

식 (1)-(3)을 사용하여 문턱 전류 이상에서 각각 모드의 이득과 파장을 구하여 주 모드와 부 모드의 정규화된 이득 차이 ($\Delta\alpha L$)를 구할 수 있다. DFB 레이저 제작 시에 발생하는 양 단면의 격자 위상값은 일정하지 않으므로 단일 모드로 발진하는 수율은 확률적으로 계산된다. 격자 위상의 전체 경우 수에서 정규화된 이득 차이가 단일 모드 발진에 필요한 값 $\Delta\alpha L_{SM}$ 이상이 되는 격자 위상의 수에 대한 비로 다음과 같이 수율을 계산할 수 있다.

$$\text{단일 모드 수율} = \frac{\Delta\alpha L > \Delta\alpha L_{SM} \text{인 격자 위상의 수}}{\text{격자 위상의 전체 경우 수}} \times 100[\%] \quad (4)$$

여기서 단일 모드 발진에 필요한 이득 마진 $\Delta\alpha L_{SM}$ 은 ICDFB 레이저의 경우 0.1로 하였다.^{14,5,7)} 본 논문에서 계산에 사용된 각 단면의 격자 위상은 간격을 $\frac{\pi}{8}$ 로 하여 양 단면의 격자 위상의 전체 경우 수를 16×16 으로 하여 단일 모드 수율을 구하였다.

III. 계산 결과 및 검토

양 단면 반사율 조합이 AR-HR과 AR-CL에 대하여 문턱

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

전류 이상에서의 IC DFB 레이저의 수율을 계산하였고 이를 문턱 전류에서 f number에 따른 수율과의 연관성에 대하여 살펴보았다. 단면 반사율 조합에서 CL은 32%, HR은 90%이고 AR은 0.1%에서 5%까지 고려하였고 결합 세기 κL 은 0.8, 1.25, 2와 3이다. 단일 모드 수율 계산 시에 양 단면의 격자 위상의 경우의 수는 16×16 조합으로 하였다. 계산에 사용한 파라미터는 표 1과 같다.

3.1. AR-HR인 IC DFB 레이저의 단일 모드 수율

그림 2는 한쪽 단면이 HR이고 다른 단면의 여러 가지 AR 반사율 값(0.1%, 1%, 3%, 5%)에 대하여 결합 세기 κL 이 0.8일 때 문턱 전류에서 f number에 대하여 도시한 IC DFB 레이저의 단일 모드 수율을 나타내는 그림이다. 예를 들어 한쪽 단면이 HR이고 다른 단면의 AR 반사율 값이 1%일 때 f number가 0.5인 경우 단일 모드 수율은 약 60%이었는데 이것은 단면 격자의 전체 위상 조합에 대하여 정규화된 이득

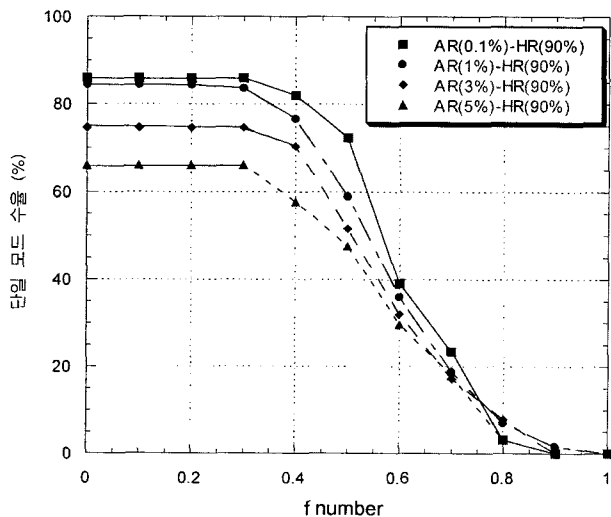


그림 2. 한쪽 단면이 HR이고 다른 단면의 여러 가지 AR 반사율 값(0.1%, 1%, 3%, 5%)에 대하여 결합 세기 κL 이 0.8 일 때 문턱 전류에서 f number에 대하여 도시한 IC DFB 레이저의 단일 모드 수율.

마진이 0.1 이상이고 f number가 0.5 이상인 양 단면 격자 위상의 조합의 비로 계산된 값이다. 즉 문턱 전류에서 SHB 영향을 나타내는 f number가 0.5 정도로 가정하였을 경우 문턱 전류 이상에서 단일 모드 수율이 약 60%로 예상할 수 있음을 의미한다. 따라서 문턱 전류에서 f number에 따른 단일 모드 수율로부터 문턱 전류 이상에서의 단일 모드 수율을 예측하기 위해서는 그에 대응되는 정확한 f number를 알아야 한다.

그림 2에서 볼 수 있듯이 κL 이 0.8인 경우 AR 단면 반사율이 작을수록 단일 모드 수율이 증가하여 AR 단면 반사율이 0.1%인 경우에는 약 85%이었다. 그러나 AR 단면 반사율이 0.1%와 1%인 경우에는 문턱 전류에서 단일 모드 수율이 거의 동일하였다. 또한 AR 단면의 반사율이 커질수록 단일 모드 수율이 감소하기 시작하는 f number가 작아짐을 볼 수 있었다. 양 단면 반사율 조합이 AR-HR인 경우 HR 단면의 반사율이 AR 단면의 반사율에 비해 상대적으로 크기 때문에 AR 단면의 반사율이 단일 모드 수율에 미치는 영향은 κL 이 작을수록 크게 나타났다. κL 이 1.25, 2와 3인 경우 그림 2와 비슷한 경향을 나타냈지만 κL 이 2와 3인 경우에는 AR 단면 반사율에 대한 단일 모드 수율은 거의 변화하지 않았다.

그림 3은 양 단면이 AR(1%)-HR일 때 여러 가지 κL 에 대하여 문턱 전류에서 f number의 함수로 도시한 IC DFB 레이저의 단일 모드 수율을 나타낸 그림이다. 예상대로 κL 이 커질수록 SHB 영향이 크게 나타나 단일 모드 수율이 급격하게 감소되기 시작하는 f number가 작아짐을 알 수 있다. κL 이 0.8인 경우 f number가 0.3까지는 단일 모드 수율이 일정하게 유지되었으나 f number가 증가할수록 단일 모드 수율은 급격하게 감소하였다.

그림 4는 양 단면 반사율 조합이 그림 2의 경우와 같고 κL 이 0.8일 때 문턱 전류 이상에서 주입 전류의 함수로 도시한 IC DFB 레이저의 단일 모드 수율을 나타내는 그림이다. AR 단

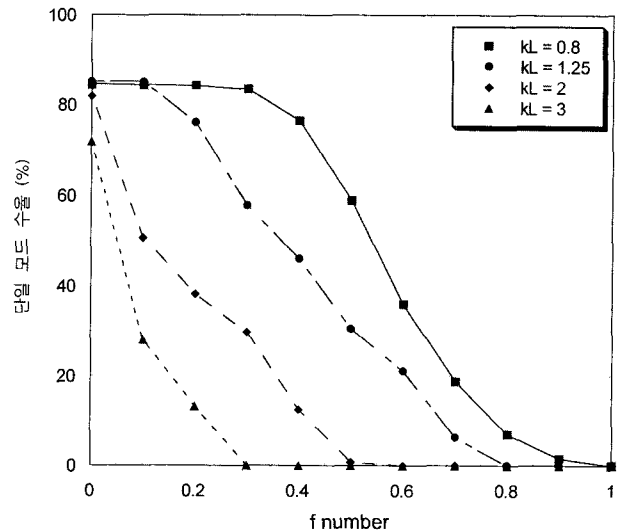


그림 3. 양 단면이 AR(1%)-HR(90%)일 때 여러 가지 κL 에 대하여 문턱 전류에서 f number의 함수로 도시한 IC DFB 레이저의 단일 모드 수율.

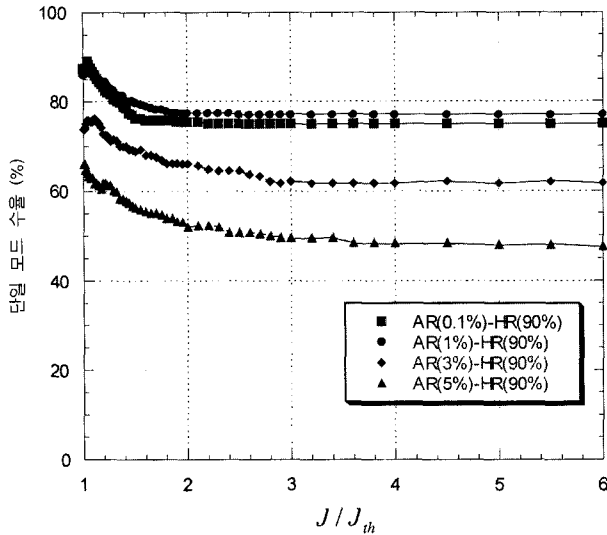


그림 4. 양 단면 반사율 조합이 그림 2의 경우와 같고 κL 이 0.8 일 때 문턱 전류 이상에서 주입 전류에 대하여 도시한 IC DFB 레이저의 단일 모드 수율.

면 반사율이 1%인 경우 단일 모드 수율이 가장 크게 나타났으며 AR 단면 반사율이 0.1%인 경우와 거의 같은 값을 보였다. 그러나 AR 단면 반사율이 증가하여 3%와 5%인 경우는 문턱 전류에서와 마찬가지로 AR 단면 반사율이 1%에 비해 문턱 전류 이상에서 단일 모드 수율이 감소하였고 또한 주입 전류에 따른 단일 모드 수율의 감소량도 증가함을 알 수 있다. 주입 전류 J/J_{th} 가 3일 때 AR 단면의 반사율이 1%일 때는 단일 모드 수율이 약 77%이었지만 0.1%일 때는 약 75%로, 5%일 때는 약 49%로 낮아졌다. AR 단면 반사율이 0.1%와 1%인 경우는 2배의 문턱 전류까지는 단일 모드 수율이 감소하였지만 2배의 문턱 전류 이상에서는 단일 모드 수율이 거의 일정함을 알 수 있었다. 또한 AR 단면 반사율이 3%와 5%인 경우는 3배의 문턱 전류까지는 단일 모드 수율이 감소하였지만 3배의 문턱 전류 이상에서는 단일 모드 수율이 거의 일정함을 알 수 있었다.

그림 5는 양 단면 반사율 조합이 그림 2의 경우와 같고 κL 이 1.25일 때 문턱 전류 이상에서 주입 전류에 대하여 도시한 IC DFB 레이저의 단일 모드 수율을 나타내는 그림이다. κL 이 0.8인 그림 4와는 달리 문턱 전류에서 단일 모드 수율은 AR 단면의 반사율 값에 관계없이 거의 같은 값을 가짐을 볼 수 있고 문턱 전류 이상에서 단일 모드 수율은 AR 단면의 반사율이 0.1%인 경우가 1%인 경우 보다 매우 큼을 볼 수 있었다. 또한 AR 단면의 반사율 변화에 따른 수율 변화가 크게 나타났다. 문턱 전류에서 단일 모드 수율은 HR 단면이 AR 단면 보다 상대적으로 반사율이 크기 때문에 AR 단면의 영향이 거의 없었으나 문턱 전류 이상에서는 AR 단면의 반사율이 커질수록 SHB 현상이 크게 발생하여 주입 전류에 따른 단일 모드 수율의 감소량이 커 짐을 알 수 있다. 주입 전류 J/J_{th} 가 3일 때 AR 단면의 반사율이 0.1%일 때는 단일 모드 수율이 약 68%이었지만 1%일 때는 약 50%로, 5%일 때는 약 34%로 낮아졌다.

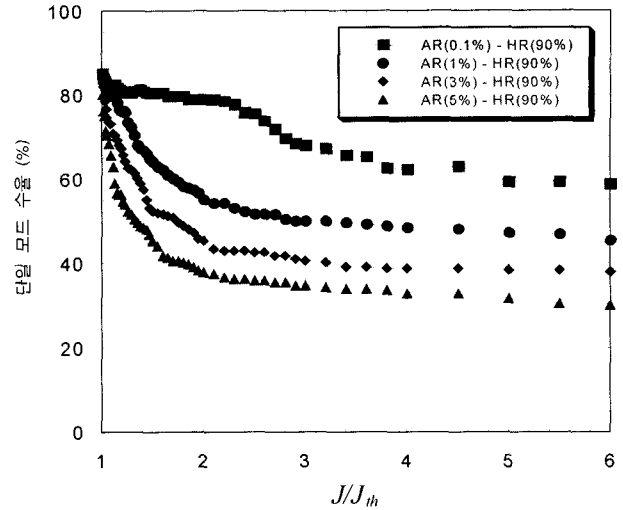


그림 5. 양 단면 반사율 조합이 그림 2의 경우와 같고 κL 이 1.25 일 때 문턱 전류 이상에서 주입 전류에 대하여 도시한 IC DFB 레이저의 단일 모드 수율.

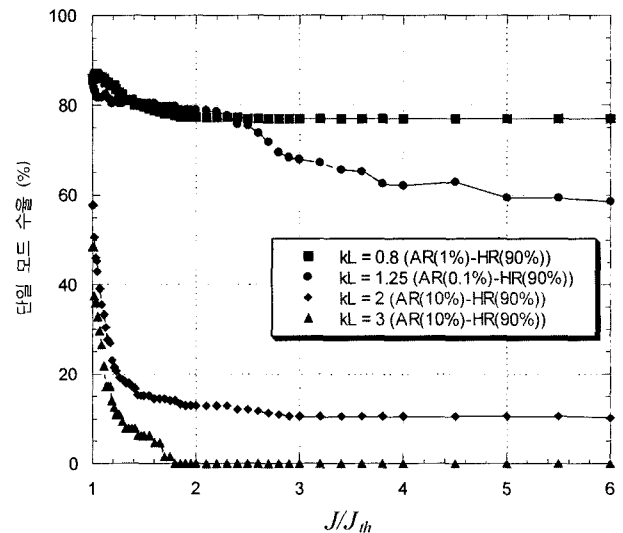


그림 6. 여러 가지 결합 세기 κL 에 대하여 한쪽 단면이 HR이고 다른 단면이 최대 단일 모드 수율을 나타내는 AR 단면의 반사율 값을 가질 때 문턱 전류 이상에서 주입 전류에 대하여 도시한 IC DFB 레이저의 단일 모드 수율.

그림 6은 여러 가지 결합 세기 κL 에 대하여 한쪽 단면이 HR이고 다른 단면이 최대 단일 모드 수율을 나타내는 AR 단면의 반사율 값을 가질 때 문턱 전류 이상에서 주입 전류에 대하여 도시한 IC DFB 레이저의 단일 모드 수율을 나타내는 그림이다. 예상대로 κL 이 커질수록 주입 전류에 따른 단일 모드 수율은 급격하게 감소하고 또한 감소량도 크게 나타남을 알 수 있다. κL 이 0.8인 경우 AR 단면의 반사율이 1%일 때가 단일 모드 수율이 가장 크고 문턱 전류에서 단일 모드 수율은 84%이고 주입 전류가 증가함에 따라 단일 모드 수율이 천천히 감소하여 3배의 문턱 전류에서는 단일 모드 수율이 77%로서 감소량은 7%이다. κL 이 1.25인 경우 AR 단면 반사율이 0.1%인 경우 가장 큰 단일 모드 수율을 보였다. 이 단일

모드 수율은 κL 이 0.8인 경우와 비교하면 주입 전류에 따른 단일 모드 수율의 변화량이 크고 또한 단일 모드 수율의 변화가 거의 발생하지 않기 시작하는 주입 전류 값도 큼을 알 수 있었다. 반면에 κL 이 2와 3인 경우 AR 단면의 반사율이 10%일 때가 단일 모드 수율이 가장 컸으나 κL 이 0.8과 1.25일 때에 비하여 AR 단면의 반사율에 따른 단일 모드 수율의 변화는 크게 발생되지 않았다. κL 이 2인 경우 문턱 전류에서 단일 모드 수율은 58%이었으나 주입 전류가 증가함에 따라 단일 모드 수율이 급격히 감소하여 2배의 문턱 전류에서는 단일 모드 수율이 13%로서 감소량은 45%로 매우 컸다. 그리고 κL 이 3일 때는 SHB 현상이 심하게 발생되어 AR 단면의 반사율에 관계없이 문턱 전류 이상에서 매우 낮은 단일 모드 수율을 보였다. 즉 κL 이 작을수록 AR 단면 반사율이 단일 모드 수율에 미치는 영향은 크게 나타났지만 SHB 현상이 작게 발생되어 문턱 전류 이상에서 단일 모드 수율의 감소량이 작아 수율이 큰 값을 유지함을 알 수 있었다.

문턱 전류 이상에서 단일 모드 수율은 SHB 현상으로 인하여 문턱 전류에서의 단일 모드 수율로부터 감소하게 된다. 그러나 여러 가지 양 단면 반사율 조합에 대하여 문턱 전류 이상에서의 단일 모드 수율을 구하기 위해서는 많은 시간이 소요된다. 따라서 많은 경우 문턱 전류에서의 f number에 따른 단일 모드 수율로부터 문턱 전류 이상에서의 단일 모드 수율을 예상한다.

그러나 그림 2와 그림 4를 비교하면 문턱 전류에서 f number에 따른 단일 모드 수율이 직접적으로 문턱 전류 이상에서의 단일 모드 수율을 의미하지 않음을 알 수 있다. 문턱 전류에서는 AR 단면 반사율이 0.1%인 경우가 단일 모드 수율이 가장 컸지만 문턱 전류 이상에서는 1%인 경우가 단일 모드 수율이 가장 크게 나타났다. 그림 6의 여러 가지 κL 에 대하여 문턱 전류 이상에서의 단일 모드 수율은 κL 이 클수록 단일 모드 수율이 감소하였고 이것은 그림 3의 문턱 전류에서 f number에 따른 단일 모드 수율에서 κL 이 클수록 f number에 따른 단일 모드 수율이 급격히 감소하는 것과 유사하지만 직접적인 관련성이 작음을 알 수 있다. 즉 양 단면 반사율 조합이 AR-HR인 IC DFB 레이저에서 문턱 전류에서 f number에 따른 단일 모드 수율과 문턱 전류 이상에서의 단일 모드 수율과의 관계는 미약함을 알 수 있었다.

3.2. AR-CL인 IC DFB 레이저의 단일 모드 수율

그림 7은 한쪽 단면이 CL이고 다른 단면의 여러 가지 AR 단면 반사율 값(0.1%, 1%, 3%, 5%)에 대하여 결합 세기 κL 이 0.8일 때 문턱 전류에서 f number에 대하여 도시한 IC DFB 레이저의 단일 모드 수율을 나타내는 그림이다. 양 단면이 AR-HR 경우인 그림 2와 마찬가지로 f number가 0.3까지는 단일 모드 수율이 동일하게 유지되었고 f number가 0.4 이상에서는 급격하게 감소하였다. 또한 AR 단면의 반사율이 작을수록 단일 모드 수율이 크고 AR 단면 반사율에 대한 단일 모드 수율 변화가 AR-HR에 비해 크게 나타났다. 이것은 한쪽 단면이 CL이기 때문에 AR-HR에 비해 AR 단면 반사율의 영향이 크게 나타나기 때문이다.

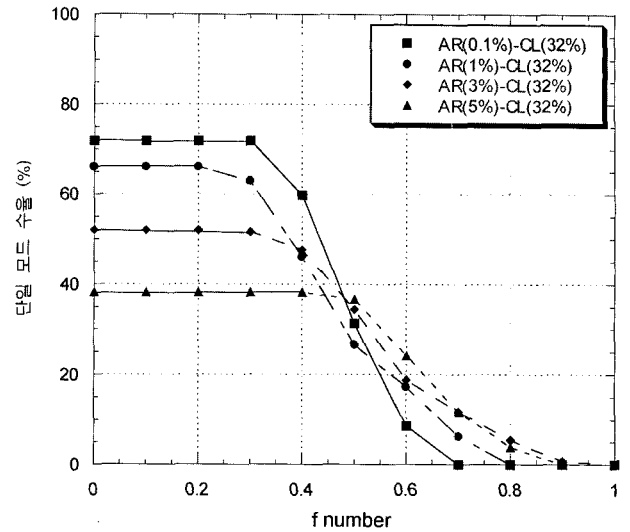


그림 7. 한쪽 단면이 CL이고 다른 단면의 여러 가지 AR 반사율 값(0.1%, 1%, 3%, 5%)에 대하여 결합 세기 κL 이 0.8일 때 문턱 전류에서 f number에 대하여 도시한 IC DFB 레이저의 단일 모드 수율.

그러나 κL 이 1.25인 경우 AR 단면 반사율이 3%일 때가 문턱 전류에서 단일 모드 수율이 가장 큼을 알 수 있었다. 이것은 주 모드의 문턱 이득 $\alpha_{th,0}$ 가 한쪽 단면 반사율 값이 0.1%일 때보다 3%일 때가 더 낮아서 결과적으로 이득 마진이 크게 되기 때문이라 생각된다. 이때 AR 단면의 반사율 값에 따른 부 모드의 $\alpha_{th,1}$ 의 변화는 주 모드의 변화보다 상대적으로 작다. AR 단면의 반사율 값이 5%일 경우에는 주 모드와 부 모드의 문턱 전류 이득이 동시에 작아져 결과적으로 이득 마진에는 큰 영향을 주지 않았다. 결합 세기가 2와 3일 때도 비슷한 경향을 보였으며 κL 이 2일 때는 AR 단면의 반사율 값이 3%, κL 이 3일 때는 AR 단면의 반사율 값이 7%일 때 문턱 전류에서의 단일 모드 수율이 가장 크게 나타났다. 결합 세기 κL 이 3일 때가 1.25와 2일 때보다 AR 단면의 반사율이 조금 큰 값에서 문턱 전류에서의 수율이 가장 크게 나타났다. 그 이유는 κL 이 커질수록 단면 반사율이 단일 모드 수율에 미치는 영향이 작게 나타나고 따라서 최대의 수율을 얻기 위한 AR 단면의 반사율이 κL 이 3인 경우가 κL 이 1.25와 2일 때보다 상대적으로 약간 커짐을 알 수 있었다. 즉 양 단면 반사율 조합이 AR-CL인 경우 AR-HR인 경우에 비해 AR 단면의 반사율이 단일 모드 수율에 미치는 영향이 크게 나타났고 또한 κL 이 작을수록 단일 모드 수율이 최대가 되는 AR 단면 반사율이 감소함을 알 수 있었다.

그림 8은 양 단면이 AR(1%)-CL일 때 여러 가지 κL 에 대하여 문턱 전류에서 f number 함수로 도시한 IC DFB 레이저의 단일 모드 수율을 나타낸 그림이다. κL 이 0.8과 1.25는 거의 비슷한 경향을 나타냈으나 그 이상의 κL 에서는 단일 모드 수율이 급격하게 감소하기 시작하는 f number가 작아짐을 알 수 있다. 즉 κL 이 0.8과 1.25인 경우 SHB 현상이 거의 나타나지 않은 반면에 κL 이 2와 3에서는 SHB 현상이 크게 발생됨을 알 수 있다.

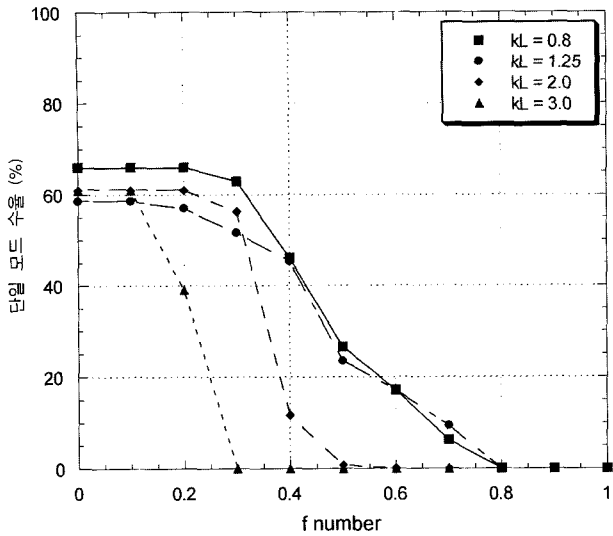


그림 8. 양 단면이 AR(1%-CL)일 때 여러 가지 κL 에 대하여 문턱 전류에서 f number 함수로 도시한 IC DFB 레이저의 단일 모드 수율.

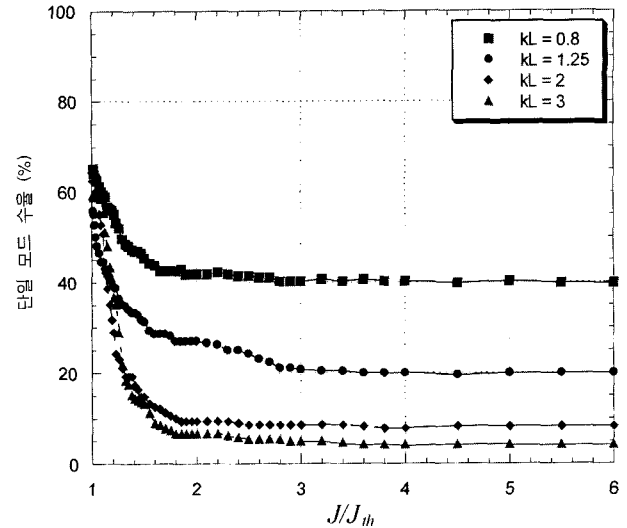


그림 10. 양 단면이 AR(1%-CL)일 때 여러 가지 κL 에 대하여 문턱 전류 이상에서 주입 전류에 대하여 도시한 IC DFB 레이저의 단일 모드 수율.

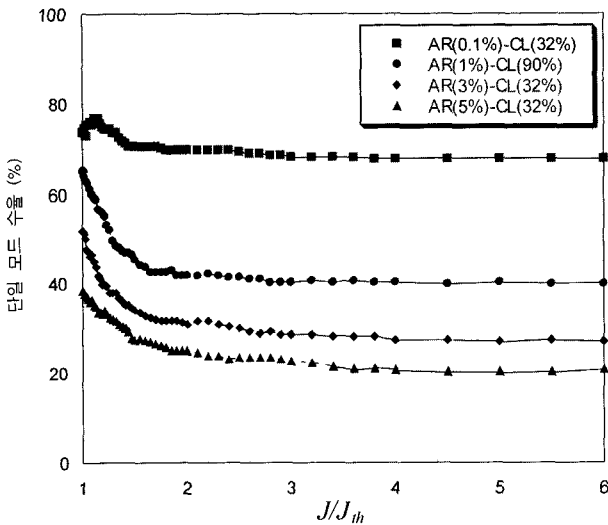


그림 9. 양 단면 반사율 조합이 그림 7의 경우와 같고 κL 이 0.8일 때 문턱 전류 이상에서 주입 전류에 대하여 도시한 IC DFB 레이저의 단일 모드 수율.

그림 9는 양 단면 반사율 조합이 그림 7의 경우와 같고 κL 이 0.8일 때 문턱 전류 이상에서 주입 전류에 대하여 도시한 IC DFB 레이저의 단일 모드 수율을 나타내는 그림이다. 주입 전류가 증가하면 공진기 내의 광자 밀도의 불균일 정도가 증가되어 이로 인하여 SHB 영향이 증가하게 된다. 따라서 문턱 전류 이상에서 주입 전류에 따른 단일 모드 수율이 감소하게 된다. 그러나 κL 이 0.8이고 AR 단면 반사율이 0.1%인 경우 SHB 현상이 거의 나타나지 않아 문턱 전류 이상에서 주입 전류에 대하여 도시한 단일 모드 수율은 거의 변하지 않음을 알 수 있다. 반면에 AR 단면 반사율이 1%, 3%와 5%인 경우는 주입 전류에 따라 단일 모드 수율이 급격하게 감소하여 3배의 문턱 전류에서 각각 40%, 28%와 22%이었으며

이것은 AR 단면 반사율이 0.1%인 경우의 단일 모드 수율 68%에 비해 매우 작음을 알 수 있다. 즉 문턱 전류 이상에서의 단일 모드 수율은 문턱 전류에서와 마찬가지로 AR이 0.1%일 때가 가장 크게 나타났고 AR이 5%일 때가 가장 작게 나타났다. κL 이 1.25, 2와 3인 경우에는 문턱 전류에서의 단일 모드 수율은 각각 AR 단면의 반사율이 3%, 3%와 7%일 때 가장 높게 나타났고 문턱 전류 이상에서의 단일 모드 수율은 κL 이 1.25인 경우에는 AR 단면 반사율이 3%, 2와 3인 경우에는 모두 10%일 때 가장 높게 나타났다.

그림 10은 양 단면 반사율이 AR(1%-CL)일 때 여러 가지 κL 에 대하여 문턱 전류 이상에서 주입 전류에 대하여 도시한 IC DFB 레이저의 단일 모드 수율을 나타내는 그림이다. 양 단면 반사율 조합이 AR-HR인 그림 6과 마찬가지로 문턱 전류 이상에서 κL 이 커질수록 SHB 현상이 커져 주입 전류에 따른 단일 모드 수율의 감소량이 크게 나타났다. κL 이 0.8인 경우 주입 전류 J/J_{th} 가 3일 때 단일 모드 수율은 약 40%로 문턱 전류일 때의 65%에 비하여 25% 감소하였고, 이 1.25인 경우는 약 58%에서 약 20%로, κL 이 2인 경우는 약 61%에서 약 9%로, κL 이 3인 경우는 약 60%에서 약 5%로 감소하였다.

문턱 전류 이상에서의 단일 모드 수율을 나타낸 그림 9와 문턱 전류에서 f number에 따른 단일 모드 수율을 나타낸 그림 7을 비교하면 문턱 전류에서 f number에 따른 단일 모드 수율이 문턱 전류 이상에서의 절대적인 단일 모드 수율을 나타내지는 않음을 알 수 있다. 예를 들어 문턱 전류 이상에서 SHB 현상이 단일 모드 수율에 미치는 영향을 문턱 전류에서 f number가 0.4 또는 0.5로 가정하였을 경우 단일 모드 수율은 문턱 전류 이상($J/J_{th} > 3$)에서의 단일 모드 수율과 큰 차이를 나타냈다. 문턱 전류에서 f number에 따른 단일 모드 수율로부터 문턱 전류 이상에서의 단일 모드 수율을 구하기 위해서는 정확한 f number를 알아야 하는데 그림 7과 같이

f number에 따른 단일 모드 수율이 매우 크게 달라지기 때문에 정확한 f number를 구하는 것은 쉽지 않다고 생각된다.

그림 10의 문턱 전류 이상에서의 여러 가지 κL 에 대한 단일 모드 수율은 κL 이 클수록 감소하였고 이것은 그림 8의 문턱 전류에서 f number에 따른 단일 모드 수율이 κL 이 클수록 급격하게 감소하기 시작하는 f number가 작아지는 경우와 유사하다. 그러나 그림 8에서 특정 f number에서의 단일 모드 수율이 절대적으로 그림 10의 문턱 전류 이상에서의 단일 모드 수율을 의미하지는 않는다. 즉 양 단면 반사율 조합이 AR-CL인 IC DFB 레이저에서 문턱 전류에서 f number에 따른 단일 모드 수율과 문턱 전류 이상에서의 단일 모드 수율과는 거의 관계가 없음을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 IC DFB 레이저에서 여러 가지 κL 과 양 단면 반사율 조합에 대하여 문턱 전류 이상에서 주입 전류에 따른 단일 모드 수율을 구하였고 그 결과를 문턱 전류에서 f number에 따른 단일 모드 수율과 비교하고 그 관련성에 대하여 검토하였다. 또한 양 단면 반사율 조합이 AR-HR과 AR-CL에 대하여 AR 단면의 반사율과 결합 세기가 단일 모드 수율에 미치는 영향에 대하여 살펴보았다.

문턱 전류에서 SHB 현상을 나타내는 f number가 고려된 단일 모드 수율이 문턱 전류 이상에서의 단일 모드 수율과는 관계가 적음을 알 수 있었다. 다만 문턱 전류에서 f number에 따른 단일 모드 수율의 감소로부터 문턱 전류 이상에서 주입 전류에 따른 단일 모드 수율의 감소를 예측할 수 있었다.

양 단면 반사율 조합이 AR-HR인 경우 κL 이 0.8일 때가 κL 이 1.25, 2와 3에 비하여 단일 모드 수율이 가장 컸다. κL 이 0.8인 경우 문턱 전류에서 AR 단면 반사율이 작을수록 단일 모드 수율이 크게 나타났고 또한 AR 단면 반사율에 따른 단일 모드 수율의 변화가 크게 발생하였다. 문턱 전류 이상에서 단일 모드 수율은 AR 단면 반사율이 1%가 가장 컸으며 이것은 AR 단면 반사율이 0.1%인 경우와 거의 같은 값을 나타냈다. 주입 전류 증가에 따른 단일 모드 수율의 감소량은 AR 단면 반사율에 관계없이 거의 같음을 알 수 있었다. 반면에 κL 이 1.25, 2와 3인 경우 문턱 전류에서 단일 모드 수율은 AR 단면 반사율에 관계없이 거의 같은 값을 나타냈다. 그러나 κL 이 1.25인 경우 문턱 전류 이상에서 단일 모드 수율은 AR 단면 반사율이 작을수록 커졌으며 또한 주입 전류 증가에 따른 단일 모드 수율의 감소량이 작음을 알 수 있었다. κL 이 2와 3인 경우 AR 단면 반사율이 단일 모드 수율에 미치는 영향은 κL 이 1.25인 경우와 비슷한 결과를 나타냈으나 κL 이 커질수록 주입 전류 증가에 따른 수율의 감소량이 커짐을 알 수 있었다.

양 단면 반사율 조합이 AR-CL인 경우 AR-HR의 경우와 마찬가지로 κL 이 0.8인 경우가 단일 모드 수율이 가장 크게 나타냈다. κL 이 0.8인 경우 문턱 전류에서와 마찬가지로 단면 반사율이 작을수록 문턱 전류 이상에서 단일 모드 수율이 큼을 알 수 있었다. AR 단면 반사율이 0.1%인 경우 문턱 전류

이상에서 주입 전류에 따른 단일 모드 수율이 거의 일정하게 유지되는 반면에 AR 단면 반사율이 1%, 3%와 5%인 경우에는 주입 전류에 따라 단일 모드 수율이 급격하게 감소됨을 알 수 있었다. 반면에 κL 이 1.25, 2와 3인 경우 각각 AR 단면 반사율이 3%, 3%와 7%일 때가 문턱 전류 이상에서 단일 모드 수율이 가장 크게 나타났으나 κL 이 커질수록 AR 단면 반사율에 따른 단일 모드 수율의 변화가 작음을 알 수 있었다. AR-HR과 마찬가지로 κL 이 커질수록 주입 전류 증가에 따른 단일 모드 수율의 감소량이 커짐을 알 수 있었다.

IC DFB 레이저에서 κL 이 0.8인 경우가 κL 이 1.25, 2와 3인 경우 보다 단일 모드 수율이 컸다. 양 단면 반사율 조합이 AR(1%)-HR인 경우가 AR(0.1%)-CL인 경우 보다 문턱 전류 이상에서 단일 모드 수율이 컸다. 또한 AR-HR인 경우 양 단면의 반사율의 비대칭성 때문에 AR-CL인 경우에 비하여 AR 단면에서 파워 추출 효율이 크리라 예상된다.

감사의 글

본 연구는 정보통신부 기초기술연구지원사업과 광주과학기술원 초고속광네트워크연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

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] Kee-Young 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.
- [3] K. David, G. Morthier, P. Vankwikelberge, R. 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.
- [4] Jun-Ichi Kinoshita and Kenji 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.
- [5] 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.
- [6] G. P. Li and T. Makino, "Single-Mode Yield Analysis of Partly Gain-Coupled Multiquantum-Well DFB Lasers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 5, no. 11, pp. 1282-1284, 1993.
- [7] 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.
- [8] B. S. K. Lo and H. Ghafouri-Shiraz, "Spectral Characteristics of Distributed Feedback Laser Diodes with Distributed Coupling Coefficient," *J. Lightwave Technol.*, vol. 13, no. 12, pp. 200-212, 1995.
- [9] I. Orfanos, T. Sphicopoulos, A. Tsigopoulos, and C. Caroubalos, "A Tractable Above-Threshold Model for the Design of DFB and Phase-Shifted DFB Lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 27, no. 4, pp. 946-956, 1991.
- [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] 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.
- [12] 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.
- [13] Boo-Gyoun Kim, Sung-Chan Cho, and Ali 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.

Single mode yield analysis of index-coupled DFB lasers above threshold for various facet reflectivity combinations

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

School of Electronic Engineering, Soongsil University, Seoul, KOREA

[†]E-mail: bgkim@e.ssu.ac.kr

(Received February 21, Revised manuscript May 6, 2003)

We have calculated the single mode yield of index-coupled (IC) DFB lasers above threshold for several κL and facet reflectivity combinations, and investigated the correlation between those results and the single mode yield as a function of f number at the threshold. As a result, there is little correlation between the single mode yield above threshold and the single mode yield as a function of f number at the threshold. The single mode yields above threshold for κL of 0.8 and 1.25 is larger than those for κL of 2 and 3 due to the spatial hole burning effect. Also, we have investigated the effect of the reflectivity of the AR facet on the single mode yield for AR-HR and AR-CL combinations. For AR-HR combinations, the single mode yield increases as the reflectivity of the AR facet decreases. However, for AR-CL combinations, the reflectivity of the AR facet for the largest single mode yield exists. In the single mode yield calculations for IC DFB lasers in this paper, the single mode yield for κL of 0.8 with AR(1%)-HR combination is largest above threshold.

OCIS Codes : 140.3490, 140.5960, 140.2020.