

論文 99-36D-12-7

DFB 레이저의 통합된 설계 변수로서의 광자 분포 중심 I :저 반사면-고 반사면 구조

(Center of Photon Mass as a Unified Design Parameter I
:DFB Lasers with Low- and High-reflection Facets)

金成翰*, 金相培**

(Sung Han Kim and Sang Bae Kim)

요 약

저 반사면-고 반사면 DFB 레이저에서 발진 모드의 문턱이득과 축 방향 광자 분포 균일성을 동시에 나타내는 통합된 설계 변수로서 광자 분포 중심(CPM, center of photon mass)을 제안하였다. 이러한 통합된 설계 변수가 필요한 것은 발진 모드의 문턱이득과 광자 밀도의 최대값과 최소값의 비, 즉 광자 밀도 비가 서로 독립적이지 않고 깊이 연관되어 있기 때문이다. 제안된 CPM은 발진 모드의 문턱이득과 반비례 관계에 있으며, 그 값이 0.5일 때 축 방향 광자 분포가 가장 균일하다. 또, 문턱이득 차이는 주 모드의 CPM과 곁 모드의 CPM의 비에 비례한다. 이에 따라 CPM을 이용하여 DFB 레이저 설계의 기본 방향을 제시할 수 있는데, 주 모드의 CPM은 0.5로 맞추어 광자 분포를 균일하게 하고 곁 모드의 CPM은 최소화하여 주 모드와의 문턱이득 차이를 크게 해야 한다. 이를 위하여는 조절 가능한 회절격자 구조 변수가 더 필요한데, sampled grating이 그 수단으로 제시되었으며, 문턱이득 차이를 증가시키는 데에 사용될 수 있음을 보였다.

Abstract

Center of photon mass (CPM), defined as the center of axial photon distribution, is proposed as a unified design parameter, which contains information about both threshold gain and nonuniformity of axial photon distribution in DFB lasers with low- and high-reflection facets. The CPM is inversely proportional to threshold gain and is 0.5 when axial photon distribution is the most uniform. Therefore, a general rule of single-frequency laser design is that main mode CPM should be around 0.5 for uniform axial photon distribution and side mode CPM should be minimized to maximize the threshold gain difference.

I. 서 론

현재 고속 광통신 시스템의 광원으로 주로 쓰이고 있는 DFB(Distributed Feedback) 레이저는 전체 광통

신 시스템의 성능, 신뢰성과 경제성을 결정하는 가장 중요한 부품 중의 하나이다. 이러한 통신용 반도체 레이저의 가장 중요한 요건은 단일 주파수 동작 안정성으로 특정 주파수 하나만 발진하도록 하는 능력을 나타낸다. 그러므로 DFB 레이저의 구조 설계에서 중점적으로 고려해야 할 것이 단일 주파수 동작이다. 이에 따라 일반적으로 새로운 구조를 설계할 때에는, 이 단일 주파수 동작에 직접적인 영향을 미치는 요소인 주 모드와 곁 모드의 문턱이득 차이와 주 모드의 광자 밀도

* 學生會員, ** 正會員, 亞洲大學校 電子工學部
(School of Electronics Engineering, Ajou University)
接受日字: 1999年2月25日, 수정완료일: 1999年11月9日

비의 변화에 관심이 집중되었다.^[1] 여기에서 광자 밀도 비는 축 방향 광자밀도의 최대값과 최소값의 비율인 S_{max}/S_{min} 로 주어진다. 최근까지 이 광자 밀도 비와 문턱이득 차이는 서로 독립적인 것으로 인식되어 왔다. 그러나 저 반사면-고 반사면 구조 DFB 레이저에서 발진 모드의 문턱이득과 공진기 안에서 축 방향 광자분포 형태는 서로 밀접하게 연관되어 있다는 사실이 밝혀졌다.^[2] 이는 단일 주파수 동작 특성을 결정하는 주 모드와 곁 모드의 문턱이득 차이와 광자 밀도 비를 지금까지의 관행대로 독립적으로 고려해서는 안되고, 동시에 고려하여야 함을 의미한다. 그러므로, DFB 레이저의 최적 구조를 찾아내기 위해서는 두 요소를 동시에 나타낼 수 있는 새로운 설계 변수가 필요하게 된다. 이 통합된 설계 변수는 단순히 문턱이득 차이를 다른 형태의 수식으로 표시하는 차원을 넘어서 DFB 레이저 구조 설계의 기본 방향을 제시할 수 있으며 설계된 구조의 특성을 분석하고 개선 방향까지 제시할 수 있게 해줄 것이다. 이 연구의 목표는 문턱이득과 광자 밀도 비를 동시에 나타낼 수 있는 하나의 새로운 변수를 제안하고 그 효용성을 검증하는 것이다. 이를 위하여 먼저 II장에서는 해석에 사용된 레이저 구조와 해석 방법에 대하여 설명하고 III장에서 DFB 레이저 공진기 안에서 광자 분포 형태를 나타내는 변수인 광자 분포 중심 즉, CPM(Center of Photon Mass)를 제안한다. IV장에서는 유효 굴절률 전달 매트릭스 방법을^[3] 이용하여 일반적으로 사용되는 저 반사면-고 반사면 DFB 레이저에 대하여 CPM의 효용성을 검증하며, 끝으로 V장에서 결론을 맺는다.

II. 소자 구조와 해석 방법

그림 1은 이 연구의 대상인 저 반사면-고 반사면 구조 DFB 레이저의 축 방향 단면도이다. 가운데에 에너지 갭 파장이 $1.55\mu\text{m}$ 인 InGaAsP 활성층이 있고, 그 위와 아래에 에너지 갭 파장이 $1.3\mu\text{m}$ 인 InGaAsP 층이 있으며, 이 세 층을 InP 층이 감싸고 있다. 균일한 삼각 함수 형태의 회절격자는 InP 기판에 있으며, 세 InGaAsP 층의 두께, 또는 평균 두께는 $0.1\mu\text{m}$ 로 두었다. 옆 방향으로는 매립형 이중 이중 접합 구조(buried heterostructure)를 하며, 활성층의 폭은 $1.5\mu\text{m}$ 로 하였다. 이에 따라 광집속 계수(optical confinement factor)는

약 0.2292가 된다. 이러한 소자 변수들을 표 1에 요약하였다. 또, 거울면은 단일 주파수 동작 수율과 한쪽 면으로의 광출력을 높이려고 많이 사용하는 저 반사-고 반사 처리된 구조로 하였으며, 저 반사면의 반사율은 1%, 고 반사면의 반사율은 80%와 65%로 두었고 공진기 길이 L은 $300\mu\text{m}$ 로 두었다.

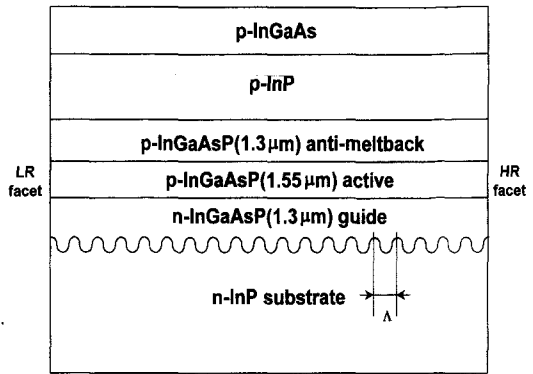


그림 1. 저 반사면-고 반사면 구조 균일 회절격자 (conventional) DFB 레이저의 축 방향 단면도
Fig. 1. Schematic structure of conventional uniform grating DFB laser with low-and high-reflection facets.

표 1. 계산에 사용된 물질 및 구조 변수와 값
Table 1. The material and device parameters used in the simulation.

물질 및 구조 변수	변수 값
회절격자 주기	0.23752 [μm]
활성층 흡수 계수	1.4×10^{-2} [$1/\mu\text{m}$]
InGaAsP($\lambda_g=1.3\mu\text{m}$) 층 흡수 계수	2.0×10^{-3} [$1/\mu\text{m}$]
n-InP 층 흡수 계수	1.0×10^{-3} [$1/\mu\text{m}$]
전류 차단층 흡수 계수	5.5×10^{-4} [$1/\mu\text{m}$]
p-InP 층 흡수 계수	1.0×10^{-3} [$1/\mu\text{m}$]
활성층 폭	1.5 [μm]
활성층 두께	0.1 [μm]
InGaAsP($\lambda_g=1.3\mu\text{m}$) 층 두께 또는 평균 두께	0.1 [μm]
공진기 길이	300 [μm]

회절 격자의 광학적 특성을 해석하는 데에 주로 사용되는 방법은 coupled mode theory를 직접 또는 매트릭스 형태로 전개하는 방법과 전달 매트릭스 방법이 있다. 가장 흔히 쓰이는 전달 매트릭스 방법은, 회절 격

자를 축방향으로 잘게 나누어 각 분할에서의 도파로 해석을 통하여 유효 굴절율을 구한 다음에, 회절 격자를 앞에서 구한 유효 굴절율의 다층 구조로 보고 다층 구조를 해석하는 매트릭스 방법을 적용한 유효 굴절율 전달 매트릭스 방법이다.^[3] k 번째 분할의 오른쪽 끝에서 입사파와 반사파의 전장 a_k, b_k 와 $k+1$ 번째 분할의 오른쪽 끝에서 입사파와 반사파의 전장 a_{k+1}, b_{k+1} 을 관계 지우는 전달 매트릭스는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} a_k \\ b_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{N_k + N_{k+1}}{2N_k} & \frac{N_k - N_{k+1}}{2N_k} \\ \frac{N_k - N_{k+1}}{2N_k} & \frac{N_k + N_{k+1}}{2N_k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(jk_0 N_{k+1} l_{k+1}) & 0 \\ 0 & \exp(-jk_0 N_{k+1} l_{k+1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{k+1} \\ b_{k+1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기에서 N_k, l_k 는 k 번째 분할의 복소 굴절율과 길이를 나타내며, 유효 굴절율을 구할 때 각 층의 굴절율은 참고문헌 [4]의 데이터를 사용하였다. 모든 분할에 대하여 이 매트릭스를 구하여 곱하면 전체 레이저의 특성을 규정하는 전달 매트릭스가 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{bmatrix} a_{in} \\ b_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{out} \\ b_{out} \end{bmatrix} \quad (2)$$

따라서 출력부로부터의 입력 out 을 0으로 두고 얻은 투과율과 반사율은 다음과 같다.

$$T = \left| \frac{a_{out}}{a_{in}} \right|^2 = \left| \frac{1}{H_{11}} \right|^2 \quad (3)$$

$$R = \left| \frac{b_{in}}{a_{in}} \right|^2 = \left| \frac{H_{21}}{H_{11}} \right|^2 \quad (4)$$

또 레이저 발진은 투과율 T 가 무한대인 조건에서 이루어지므로, $H_{11} = 0$ 을 만족시키는 이득과 파장이 발진 문턱 이득과 발진 파장이 된다. 그리고 이 발진 문턱 이득 값과 발진 파장에서 레이저 구조의 전달 매트릭스를 구한 다음에 (1)식을 이용하여 a_k, b_k 를 구하면, 상대적인 광자밀도 S_k 를 다음 식을 사용하여 구할 수 있다.

$$S_k = |a_k|^2 + |b_k|^2 \quad (5)$$

여기에서 k 번째 분할의 축 방향 위치를 z 축 상의 좌표로 나타내면 S_k 를 $S(z)$ 로 변환시킬 수 있다.

이 전달 매트릭스 방법에서는 회절격자의 구조와 매트릭스가 직접적으로 대응되므로 주기적인 회절격자는 물론 주기적이지 않은 어떠한 구조의 회절격자라도 쉽게 해석할 수 있어, 회절격자 구조의 변화가 미치는 영향 등을 해석하는 데에도 매우 유용하다. 또, 회절격자의 높이가 높을 때에도 coupled mode theory 결과보다 정확하다고 알려져 있다. 물론 회절격자의 높이가 낮을 때에는 두 방법으로 구한 해석 결과는 잘 일치한다. 이 연구의 대상에 회절격자가 부분적으로 제거된 sampled grating 구조가 포함되어 있으므로, 기본 TE 모드에 대하여 전달 매트릭스 방법을 사용하였다. 또, 이 해석에서는 회절격자 결합계수 x 가 사용되지는 않지만, coupled mode 이론에 따른 결합계수와 공진기 길이의 곱인 xL 을 회절격자의 높이를 나타내는 척도로 사용하였다. 물론 결합계수 x 는 삼각함수와 회절격자에서 유효 굴절률 변화의 진폭 Δn_{eff} 와 파장 λ 의 함수로 $x = \pi \Delta n_{eff} / \lambda$ 로 주어진다.

III. 통합된 설계 변수로서의 CPM

1. 저 반사면-고 반사면 DFB 레이저에서의 CPM

DFB 레이저의 한쪽 거울면은 저 반사막을, 다른 거울면은 고 반사막을 입힌 저 반사면-고 반사면 DFB 레이저는 높은 단일 주파수 동작 수율, 높은 출력 등의 장점 때문에 가장 널리 사용되는 DFB 레이저 구조의 하나이다. 이 레이저에서도 단일 주파수 동작의 가장 중요한 요건인 문턱이득 차이는 주 모드와 결 모드의 문턱이득의 차이로 주어진다. 문턱이득은 거울면의 영향을 크게 받는데, 어느 모드의 광자밀도 분포가 고 반사면으로 집중될수록 반사면 손실이 작아져 그 모드의 문턱이득이 낮아질 것이다. 이에 따라 주 모드의 광자 밀도가 결 모드에 비하여 상대적으로 고 반사면 쪽으로 많이 분포하면 주 모드의 반사 손실은 작아지고 결 모드의 반사 손실은 상대적으로 커져 문턱이득 차이가 커지게 된다. 이것은 문턱이득 차이가 공진기 길이 방향의 광자 분포 형태에 따라 변한다는 것을 나타내며, 따라서 광자 밀도 비와 문턱이득 차이의 두 요소를 각각 독립적으로 조절하기란 매우 힘들게 된다. 실제로 이 저 반사면-고 반사면 DFB 레이저에서 양쪽 거울면

에서 측정한 광출력 비와 문턱이득 차이 사이에는 직접적인 관계가 있음을 밝힌 연구 내용이 발표되었으며^[2], 이때 이 광출력 비는 광자분포 형태를 간접적으로 나타내는 것이다. 그렇지만 광출력 비로는 양쪽 거울면 근처의 광자분포 형태만 추정할 수 있다.^[5] 또 회절격자의 결합상수 κ 와 공진기 길이 L 의 곱인 κL 이 커져 회절격자의 영향이 커지면 광자분포의 형태가 복잡해지게 되어 광출력 비를 사용하는 방법의 신뢰성이 떨어지게 된다. 위의 연구^[2]에서도 κL 이 1.3 이상으로 커지면 광출력 비와 문턱이득 차이와의 상관성이 떨어지기 때문에, 통합된 설계 변수로서 광출력 비를 사용하는 데에는 한계가 있었다. 특히 κL 이 1.3 부근인 영역은 저 반사면-고 반사면 구조의 거울면 반사율에 따라서는 매우 높은 수율을 얻을 수 있는 곳이기 때문에^[6] κL 이 1.3 이상일 때에도 문턱이득 차이나 광자 밀도 비와 높은 상관성을 나타내는 새로운 변수가 필요하다.

광출력 비를 대체하기 위하여 공진기 안에서 광자 분포 중심의 위치를 공진기 길이로 정규화한 CPM(Center of Photon Mass) ζ 를 사용하며, 다음과 같이 정의한다.

$$\zeta \equiv \frac{\int_0^L S(z) \cdot z \cdot dz}{L \cdot \int_0^L S(z) \cdot dz} \quad (6)$$

- z : 저 반사면을 원점으로 한 공진기 축 방향 좌표
- $S(z)$: 축 방향으로의 광자분포
- L : 공진기 길이

이와 같이 정의한 CPM은 축 방향 광자 분포의 정규화된 중심을 나타내며 $0 < \zeta < 1$ 사이의 값을 가질 수 있는데, 1에 가까울수록 고 반사면으로, 0에 가까울수록 저 반사면으로 광자가 치우친 것을 나타낸다.

그림 2에 1%-80% 균일 회절격자(conventional) DFB 레이저에서 CPM과 단일 주파수 동작에 영향을 미치는 문턱이득, 광자 밀도 비, 그리고 문턱이득 차이와의 상관도를 나타내었다. 하나의 κL 값에 대하여 12×12 조합의 거울면 회절격자 위상에 대하여 계산한 결과이다. 그림 2(a)에서 문턱이득과 CPM은 서로 반비례 관계를 보이고 있는데, 이것은 CPM이 클수록, 즉 공진기내의 광자분포가 고 반사면 쪽으로 많이 치우칠수록 문턱이득이 낮아지는 것을 나타낸다. 또 주 모드와 결 모드의

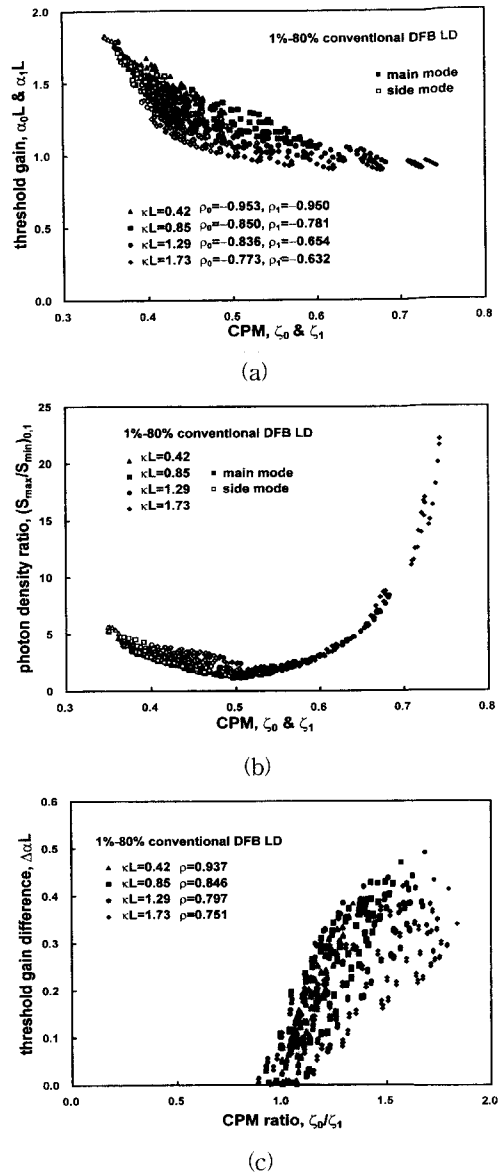


그림 2. 1%-80% 균일 회절격자(conventional) DFB 레이저에서 κL 에 따른 (a) 문턱이득과 CPM, (b) 광자 밀도 비 S_{\max}/S_{\min} 와 CPM, (c) 문턱이득 차이와 주 모드와 결 모드의 CPM 비 ζ_0/ζ_1 의 상관성. 아래 첨자 0, 1은 각각 주 모드와 결 모드를 나타내며, (a)에서 ρ 는 CPM과 문턱이득 사이의, (c)에서 ρ 는 문턱이득 차이와 CPM 비 사이의 상관계수이다

Fig. 2. Correlation (a) between threshold gain and the CPM, (b) between photon density ratio S_{\max}/S_{\min} and the CPM, and (c) threshold gain difference and the CPM ratio ζ_0/ζ_1 in 1%-80% conventional DFB lasers. The correlation coefficient is denoted by ρ .

문턱이득과 CPM은 그 분포 위치에 차이를 보이고 있다. 곁 모드는 주 모드에 비하여 CPM 값은 작고 문턱이득은 크므로, 상하여진 xL 에서 그림 2(a)의 왼쪽 위에 분포한다. xL 이 2보다 작은 실제로 중요한 영역에서 CPM과 문턱이득 사이의 상관 계수는 그림에 $\rho_{0,1}$ 로 나타난 것처럼 0.6 이상이어서 광출력 비에 비하여 훨씬 우수한 설계 변수가 된다. 여기에서 첨자 0, 1은 각각 주 모드와 곁 모드를 나타낸다. 이러한 사실로부터 단일 주파수 동작에 가장 중요한 요소인 문턱이득 차이를 크게 하는 데에 필요한 주 모드와 곁 모드의 이상적인 광자분포 형태를 추정할 수 있다. 주 모드의 CPM은 크게 하여 문턱이득을 낮추고 곁 모드의 CPM은 작게 하여 문턱이득을 높여 문턱이득 차이를 크게 하여야 한다는 것이다. 즉, DFB 레이저에서 광자분포 형태에 변화를 주어 단일 주파수 동작을 향상시키고자 할 때, 주 모드의 CPM ξ_0 과 곁 모드의 CPM ξ_1 의 차이를 가능한 한 크게 하여야 하는 것이다.

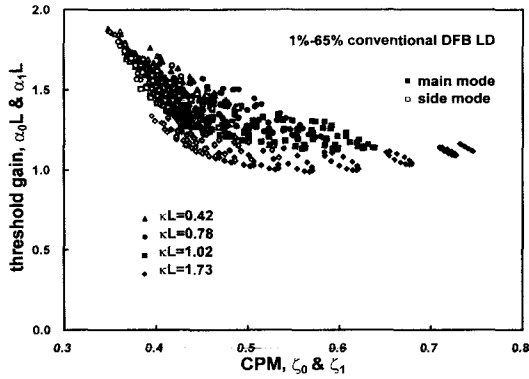
그림 2(b)에 보인 것처럼 광자 밀도 비 S_{max}/S_{min} 도 CPM과 높은 상관성을 나타내고 있다. 주목할만한 사실은 CPM이 0.5일 때 광자 밀도 비가 1에 가까워지며 0.5보다 크거나 작아지면 광자 밀도 비가 커진다는 것이다. CPM이 0.5라는 것은 광자 분포가 전체 공진기 영역에서 일정하거나 광자분포가 불균일하더라도 공진기 중앙을 기준으로 양쪽이 대칭인 형태임을 의미한다. 단일 주파수 동작 수율이 높은 $xL < 2$ 인 영역에서는 광자분포가 대부분 단조 증가 또는 단조 감소 함수의 형태로 주어지므로, 저 반사면-고 반사면의 거울면 구조에서 광자분포 형태가 심하게 불균일하면서 대칭인 경우는 없다. 이러한 사실은 그림 2 (b)에서 CPM이 0.5일 때 광자 밀도 비의 최대 값이 3 미만임을 보더라도 알 수 있다. 따라서 CPM이 0.5라는 것은 광자분포가 평탄하다는 것을 나타내며, 이 때 spatial hole burning^[7] 현상이 최소화된다고 볼 수 있다. 이처럼 CPM에는 문턱이득과 광자 밀도 비에 대한 정보가 함께 들어있다.

그림 2 (c)에는 단일 주파수 동작 안정성을 결정하는 문턱이득 차이 ΔaL 과 CPM 비 ξ_0/ξ_1 사이의 상관성을 나타내었다. CPM비는 주 모드의 CPM(ξ_0)을 곁 모드의 CPM(ξ_1)으로 나눈 값인데 그 값이 1보다 크면 곁 모드에 비하여 주 모드가, 1보다 작으면 주 모드에 비하여 곁 모드가 상대적으로 고 반사면에 많이

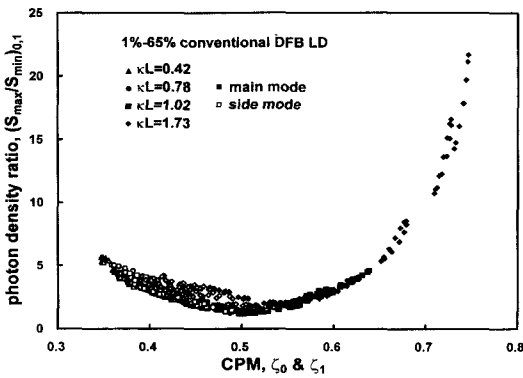
치우친 것을 나타낸다. 그림에서 문턱이득 차이와 CPM 비는 대체로 비례관계를 보이며 xL 이 2 이하일 때에는 상관 계수도 0.7보다 크다. 이처럼 CPM비가 1보다 커지면 커질수록 문턱이득 차이는 커지고 그 반대이면 문턱이득 차이는 작아진다. 이것은 앞에서 문턱이득과 CPM의 상관성에 대하여 살펴볼 때, 주 모드와 곁 모드의 CPM 차이가 커질수록 단일 주파수 동작 능력이 향상된다고 예측한 것과 일치한다.

CPM이라는 새로운 변수를 정의하고 사용하려는 기본적인 목표는, 저 반사면-고 반사면 DFB 레이저에서 문턱이득 차이와 광자 밀도 비가 독립적이지 않고 깊이 연관되어 있기 때문에, 이 두 변수를 동시에 나타낼 수 있는 변수를 사용하여 새로운 DFB 레이저 구조 설계의 편의성을 도모하려는 데에 있다. 그림 2에서 알 수 있듯이 CPM은 문턱이득과 광자 밀도 비를, CPM 비 ξ_0/ξ_1 은 문턱이득 차이를 잘 나타내고 있으며, 상관성도 매우 높다. 그렇지만 xL 이 커지면서 CPM과 문턱이득 및 광자 밀도 비, CPM 비와 문턱이득 차이의 상관관계가 줄어들어 CPM은 $xL < 2.0$ 에서만 그 의미가 있으며, xL 이 이보다 커지면 상관성이 떨어져 그 의미가 약해진다. 이것은 CPM이 기본적으로 회절격자에 의한 feedback보다 고 반사면에 의한 feedback이 우세할 때 의미가 있도록 정의되었기 때문이며, 회절격자의 높이가 높아져 회절격자에 의한 feedback의 영향이 거울면 반사의 영향보다 커지게 되면 그 의미가 약해진다. 그러나 광출력 비보다 xL 에 대한 적용 범위가 훨씬 넓어^[2] 저 반사면-고 반사면 구조 DFB 레이저에서 수율이 높은 xL 영역을 모두 포함한다. 특히 회절격자보다는 거울면에 의한 영향이 클 때 사용할 수 있다는 것은 불균일 회절격자 구조와 같은 임의의 회절격자 구조에 대해서도 적용할 수 있다는 것을 의미한다. 이것이 CPM을 이용한 분석 방법의 특징이며 지금까지 사용된 다른 변수보다 그 효용성이 큰 이유이다.

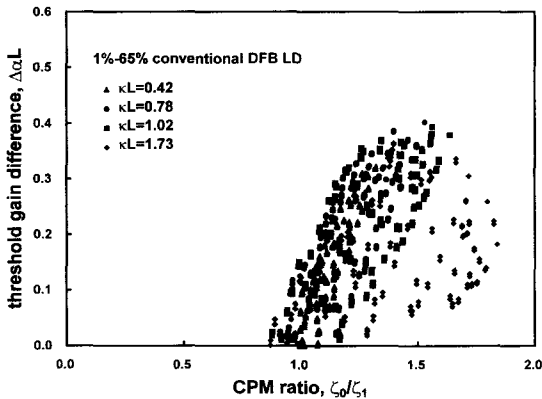
그림 3에는 1%-65% 균일 회절격자(conventional) DFB 레이저에서 CPM과 단일 주파수 동작에 영향을 미치는 문턱이득, 광자 밀도 비, 그리고 문턱이득 차이와의 상관 관계를 나타내었다. 그림 2와 비교해 보면 전반적인 특성은 동일하다. 이러한 사실은 CPM을 이용한 분석 방법이 1%-80% 거울면 구조에서만 아니라 저 반사면-고 반사면 구조에 공통적으로 적용될 수



(a)



(b)



(c)

그림 3. 1%-65% conventional DFB 레이저에서 κL 에 따른 (a) 문턱이득과 CPM, (b) 광자 밀도 비와 CPM, (c) 문턱이득 차이와 CPM 비 ζ_0/ζ_1 의 상관성

Fig. 3. Correlation (a) between threshold gain and the CPM, (b) between photon density ratio S_{max}/S_{min} and the CPM, and (c) threshold gain difference and the CPM ratio ζ_0/ζ_1 in 1%-65% conventional DFB lasers.

있음을 보여준다. 그런데 양쪽 거울면 반사율의 차이가 작기 때문에 회절격자의 영향이 커져 κL 이 커지면서 CPM과 문턱이득, CPM 비와 문턱이득 차이 사이의 상관 관계가 낮아짐을 볼 수 있다.

2. 통합된 설계 변수로서의 CPM

DFB 레이저의 단일 주파수 동작은 광 송신기로서의 동작 특성 가운데 가장 중요한 요소이다. 이 단일 주파수 동작 특성은 문턱이득 차이와 주 모드 광자 밀도 비의 영향을 크게 받기 때문에, DFB 레이저의 설계에서 우선적으로 고려해야 할 점은 바로 큰 문턱이득 차이와 낮은 광자 밀도 비를 얻도록 하는 것이다. 그러나 지금까지는 서로 관련된 이 두 요소에 영향을 미치는 요인들과 그 영향을 직관적으로 이해할 수 있는 틀이 없었다는 것이 설계에 있어 큰 문제점으로 인식되어왔다. 즉, 어느 DFB 레이저 구조에서 문턱이득과 광자밀도가 어떻게 변하는지에 대한 예측이 매우 힘들었다. CPM이 가지는 큰 의미는 앞 절에서 살펴본 바와 같이 바로 이 두 요소의 변화를 직관적으로 이해할 수 있는 틀을 제공한다는 데에 있다. 그러므로 CPM을 이용하면 DFB 레이저 구조 설계의 기본 방향을 보다 구체적으로 제시할 수 있다. 이것은 CPM이 문턱이득 차이와 광자 밀도 비를 회절격자 구조와 거울면 반사율 등 DFB 레이저 구조 변수와 직접 관련되는 광자분포와 직접적으로 연관시켰기 때문인데, 이 연관성을 염두에 두고 주 모드와 결 모드의 광자분포 형태를 조절함으로써 문턱이득 차이와 광자 밀도 비를 우리가 원하는 방향으로 조절할 수 있는 것이다. 문턱이득 차이를 크게 하려면 주 모드의 문턱이득은 작게, 결 모드의 문턱이득은 크게 해야 한다. 이것을 그림 2 (a)와 그림 3 (a)의 결과를 이용하여 CPM에 적용하면 주 모드의 CPM (ζ_0)은 크게, 결 모드의 CPM (ζ_1)은 작게 하여야 하는 것이다. 즉, 주 모드의 광자는 고 반사면으로, 결 모드의 광자는 저 반사면 쪽으로 치우치게 해야 하며 그 차이를 크게 하는 것이 큰 문턱이득 차이를 얻기 위한 기본적인 요건이 된다. 다음으로 spatial hole burning을^[7] 없애려면 주 모드의 광자 분포가 가능한 균일하여 광자 밀도 비가 1이 되어야 하는데, 그림 2 (b)와 그림 3 (b)에서처럼 각 모드의 광자 밀도 비는 CPM이 0.5일 때 최소 값을 가진다. 따라서 문턱이득 차이와 광자 밀도 비를 함께 고려하여 단일 주파수 동

작을 향상시키기 위해서는, ζ_0 은 0.5로 맞추어 주 모드의 광자 분포는 가능한 평탄하게 하고, 결 모드는 저 반사면으로 치우치게 하여 ζ_1 을 최소화하여야 한다. CPM을 이용한 이 기본적인 설계 방법론은 새로운 DFB 레이저의 설계 즉, 거울면 반사율을 변화시키거나 불균일 회절격자(nonuniform grating) 구조를 설계하는 데에 유용하게 쓰일 수 있다. 이와 같이 CPM은 DFB 레이저 설계에 있어 기본 방법론을 제시하고 있는 것이다. 이러한 측면에서 보면, 저 반사면-고 반사면 구조에서 단일 주파수 동작이 이루어지는 것은 금지대 가장자리의 두 모드 가운데에서 광자 분포가 고 반사면으로 치우쳐져 있는 것이 주 모드가 되기 때문으로 해석할 수 있다.

이렇게 CPM이 통합된 설계 변수로서 유용하지만, 실제로 CPM 값을 얻으려면 발진 파장과 문턱이득, 광자 분포를 알아야 하는 문제점이 있다. 그렇지만, CPM은 서로 독립적이라고 잘못 인식되어 왔던 문턱이득 차이와 광자 밀도 비 사이의 관련성을 간단한 형태로 보여 주기 때문에, 앞에서 기술한 대로 기본적인 설계 원칙을 제시하여 줄 뿐 아니라 주 모드 선택 기구를 직관적으로 보여 준다. 또, 몇몇 경우에 대하여 CPM 값을 구해보면, 구조 변화와 CPM, 즉 단일 주파수 동작 특성 사이의 경향성을 찾아낼 수 있다. 이러한 CPM의 기능은 특히 불균일한 회절격자 구조의 DFB 레이저 설계에 매우 유용한 지침으로 사용될 수 있다. 다음 장에서는 불균일한 회절격자 구조의 설계에 CPM이 어떻게 사용되는지를 기술한다.

IV. sampled grating을 이용한 CPM의 조절과 DFB 레이저의 설계

지금까지 CPM의 정의와 그것이 DFB 레이저에서 문턱이득 차이나 광자 밀도 비와 어떤 관계가 있으며, DFB 레이저의 설계에서 어떻게 사용될 수 있는지 알아보았다. 이 장에서는 CPM을 이용하여 새로 설계한 몇 가지 DFB 레이저의 특성을 살펴봄으로써 통합된 설계 변수로서의 실질적인 효용성을 검토하여 보기로 한다. CPM을 DFB 레이저 설계에 이용하는 것은 광자 분포 형태를 변화시킴으로써 단일 주파수 동작 특성을 향상시키겠다는 의도에서이다. 균일 회절격자 구조에서 xL 을 조절하면 ζ_0 의 조절은 가능하지만, ζ_0 값이 결

정되면 ζ_1 값도 결정되므로 문턱이득 차이를 최대화하기 위하여 ζ_1 을 최소화하는 데에는 한계가 있다. 이에 따라, 이 연구에서는 광자 분포 형태, 즉 ζ_0 과 ζ_1 을 독립적으로 조절하는 요소로서 sampled grating^[8]을 사용한다. sampled grating은 그림 4에 보인 대로 균일 회절격자 구조에서 부분적으로 회절격자를 제거하여 유효 굴절률의 변화가 없는 균일한 도파로 구조를 갖게 한 부분을 말하며, 이에 따라 x 값이 위치에 따라 달라지는 불균일 회절격자가 되어, 축 방향 광자분포를 조절할 수 있게 한다. 특히 이 sampled grating은 다른 불균일 회절격자에 비하여 제작하기가 쉬운데, 그것은 균일 회절격자를 제작할 때 sampled grating 부분을 etching mask를 사용하여 식각되지 않도록 하면 되기 때문이다. 이 연구에서 사용하는 sampled grating은 약 4 μm (회절격자 20주기)정도 회절격자가 없는 구간(sampled grating 영역) 10개를 삽입한 구조로 일차적으로 유효 결합계수의 회절격자 높이에 대한 의존성을 낮추었다. 더 나아가 주 모드와 결 모드의 광자분포 형태를 ζ_0 은 0.5에 가깝게, ζ_1 은 작게 되도록 sampled grating의 위치를 변화시켜 단일 주파수 동작 안정성을 향상시켰다.^[2]

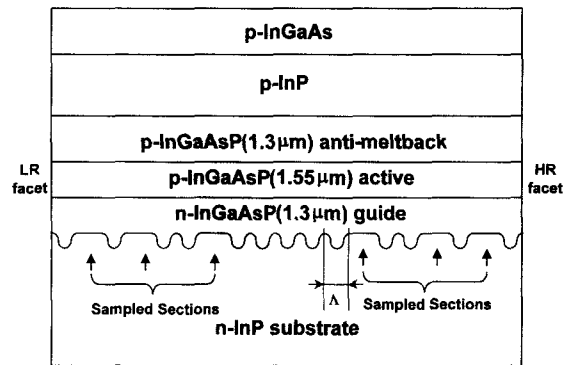


그림 4. sampled grating이 첨가된 저 반사면-고 반사면 구조 균일 회절격자(conventional) DFB 레이저의 축 방향 단면도

Fig. 4. Schematic structure of sampled grating DFB laser with low- and high-reflection facets.

이제 앞에서 살펴본 1%-80% 거울면 DFB 레이저에 대하여 sampled grating이 어떤 역할을 하는지 CPM을 이용하여 알아보기로 한다. 그림 4의 sampled grating이 포함된 double-chirped sampled DFB 레이저^[2]는 회

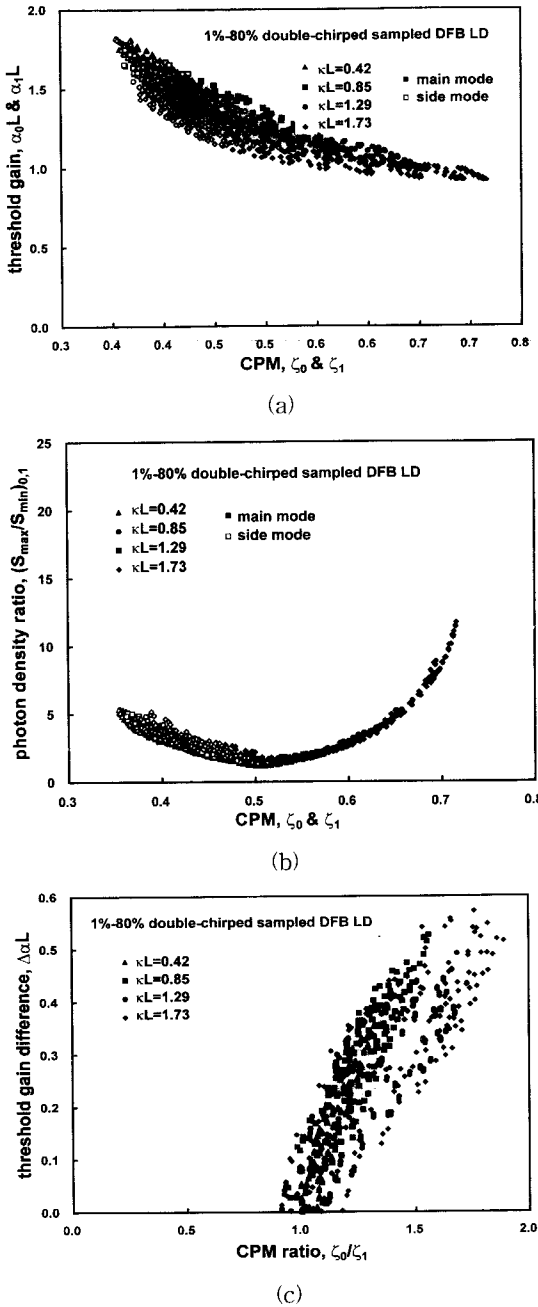


그림 5. 1%-80% double-chirped sampled grating DFB 레이저에서 xL 에 따른 (a) 문턱이득과 CPM, (b) 광자 밀도 비와 CPM, (c) 문턱이득 차이와 CPM 비 ξ_0/ξ_1 의 상관성

Fig. 5. Correlation (a) between threshold gain and the CPM, (b) between photon density ratio S_{max}/S_{min} and the CPM, and (c) threshold gain difference and the CPM ratio ξ_0/ξ_1 in double-chirped sampled grating DFB lasers with 1%-80% facets.

절격자 구조 이외의 다른 요소들은 모두 1%-80% conventional 구조와 동일하다. 길이가 회절격자 주기의 20배인 sampled grating 사이의 간격은 양쪽 거울면 근처에서 좁고, 공진기 중앙에서 넓으며 좌우 대칭이다. 그림 5에 double-chirped sampled DFB 레이저의 문턱이득과 광자 밀도 비, 그리고 문턱이득 차이에 대한 CPM과의 상관성을 나타내었다. 그림 2와 비교해 보면 CPM이 대체로 작아진 것을 확인 할 수 있다. 문턱이득의 경우 주 모드와 결 모드 모두 CPM이 작아져 문턱이득이 커지기 때문에 큰 변화가 없어 보이지만 그 변화 정도에 차이가 있다. xL 이 0.85보다 클 때에는 ξ_0 이 작아지기는 했지만 ξ_1 이 더 많이 작아져 문턱이득 차이가 더 커졌다(그림 6을 보면 이 사실을 더 확실히 볼 수 있다).

그림 5 (b)를 그림 2 (b)와 비교하여 보면, xL 이 클 때에는 주 모드의 CPM이 0.5 쪽으로 작아지면서 주 모드 광자 밀도 비의 감소가 눈에 띄게 큰데, 이처럼 광자 밀도가 작아지면 단일 주파수 동작 안정성은 훨씬 높아진다. 실제로 xL 이 1.73일 때, CPM과 광자밀도비의 평균값이 균일 회절격자 레이저에서 각각 0.61, 6.58이었던 것이 sampled grating DFB 레이저에서 각각 0.6, 4.35로 줄어들었다. 그림 5 (c)에 문턱이득 차이와 CPM 비의 상관도를 나타내었는데 그림 2 (c)와 비교해보면, xL 이 클 때 문턱이득 차이의 증가를 분명히 확인할 수 있고 CPM 비에 대한 상관성도 더 우수한 것을 확인 할 수 있다. 이 결과는 불균일 회절격자 구조인 sampled grating DFB 레이저에서도 CPM의 개념이 그대로 적용될 수 있음을 보여주고 있다.

그림 6에 두 구조의 문턱이득 차이와 CPM 비의 비 $(\xi_0/\xi_1)_s/(\xi_0/\xi_1)_c$ 사이의 상관도를 나타내었다. 여기에서 아래 첨자 s 와 c 는 각각 double-chirped sampled grating과 conventional grating 구조를 나타낸다. double-chirped sampled 구조를 사용하면 전반적으로 CPM 비가 증가하여 더 큰 문턱이득 차이를 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 이처럼 새로운 회절격자 구조를 설계할 때 CPM의 개념을 이용하여 주 모드와 결 모드의 광자분포 형태를 조절하면 단일 주파수 동작 특성을 향상시킬 수 있다. 여기에서 제시된 sampled grating 구조는 하나의 예로 보인 것으로, 최적 구조는 아니다. 그러므로, 이러한 방법을 통하여 더 좋은 구조의 설계가 가능하다. 이와 같이 CPM은 저 반사면-고

반사면 구조 DFB 레이저에서 불균일 회절격자 변수의 조절을 통한 단일 주파수 동작 안정성 향상에 통합된 설계 변수로서 사용된다. 특히 단일 주파수 레이저 설계의 기본 틀을 제공한다는 데에 큰 의미가 있다.

V. 결 론

저 반사면-고 반사면 DFB 레이저에서 단일 주파수 동작 특성을 결정하는 문턱이득 차이와 광자 밀도 비를 모두 나타내는 통합된 설계 변수로서 CPM이라는 새로운 변수를 정의하였고, 이 CPM이 문턱이득 및 광자 밀도 비와 어떻게 관계되는지를 보였다. 그리고 이 CPM을 이용하여 단일 주파수 동작 특성을 향상시키는 회절격자 구조 설계 방법론을 제시하였고, 그 예를 보였다. 새롭게 제안한 CPM은 문턱이득과는 반비례 관계에 있으며, 광자 밀도 비는 CPM이 0.5일 때 가장 작고 0.5에서 벗어날수록 커진다. 또 주 모드와 결 모드의 CPM 비 ξ_0 / ξ_1 은 문턱이득 차이와 비례 관계에 있다. 그러므로 문턱이득 차이를 키우고 광자밀도 분포를 균일하게 하여 단일 주파수 동작 안정성을 높이려면 주 모드 CPM ξ_0 은 0.5 부근에 맞추어야 하며 결 모드의 CPM ξ_1 은 최소화 시켜야 한다. ξ_0 과 ξ_1 을 독립적으로 최적화하기 위하여 sampled grating을 도입하였으며, 1%~80% 반사면 DFB 레이저의 단일 주파수 동작 특성을 향상시킬 수 있음을 보였다. CPM은 회절격자에 의한 반사보다 거울면 반사의 영향이 크고 거울면 반사율이 비대칭일 때 정의되며, 이 조건만 만족되면 불균일 회절격자 DFB 레이저에도 적용될 수 있다.

지금까지 문턱이득 차이와 광자 밀도 비를 동시에 반영할 수 있는 변수가 없다는 것이 DFB 레이저의 회절격자 구조 변화에 대한 연구를 가로막는 장애물로 작용해왔다. 이제 CPM을 사용하게 됨으로써 DFB 레이저 구조 설계의 기본 방향이 제시되어 DFB 레이저 구조의 특성 분석과 개선 방향을 파악할 수 있다는 데에 이 연구의 중요성이 있다.

참 고 문 헌

[1] K. David, G. Morthier, P. Vankwikelberge, R. G. Baets, T. Wolf, and B. Borchert, "Gain-coupled DFB lasers versus

index-coupled and phase-shifted DFB lasers: a comparison based on spatial hole burning corrected yield," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 27, pp. 1714-1723, June 1991.

- [2] S. B. Kim and S. H. Kim, "Tailoring characteristics of DFB lasers with low- and high-reflection facets by using sampled gratings," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 9, No. 8, pp. 1078-1080, August 1997.
- [3] T. Makino, "Effective-index matrix analysis of distributed feedback semiconductor lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 28, no. 2, pp. 434-440, Feb. 1992.
- [4] C. H. Henry, L. F. Johnson, R. A. Logan, and D. P. Clarke, "Determination of the refractive index of InGaAsP epitaxial layers by mode line luminescence spectroscopy," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 21, no. 12, pp. 1887-1892, Dec. 1985.
- [5] S. B. Kim and J. D. Lee, "On the validity of estimating axial nonuniformity of photon density from output ratio in uniform grating DFB lasers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 9, No. 1, pp. 28-30, Jan. 1997.
- [6] 김성환, 김상배, "Index-coupled DFB 레이저의 구조에 따른 단일 주파수 동작 특성," *Telecommunications Review.*, 7권 3호 pp. 362-375, 1997
- [7] L. J. P. Ketelsen, I. Hoshino, and D. A. Ackerman, "Experimental and theoretical evaluation of the CW suppression of TE side modes in conventional 1.55 μm InP-InGaAsP distributed feedback lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 27, no. 4, pp. 965-975, April 1991.
- [8] V. Jayaraman, A. Mathur, L. A. Coldren, and P. D. Dapkus, "Extended tuning range in sampled grating DBR lasers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 5, No. 5, pp. 489-491, May 1993.

 저 자 소 개



金成翰(正會員)

1969년 10월 3일생. 1996년 2월 아주대학교 전자공학과(공학사). 1998년 6월 아주대학교 전자공학과(공학석사). 1999년 2월 현재 아주대학교 전자공학과 박사과정 주관심분야는 반도체 레이저, 광전소자 등



金相培(正會員)

1959년 2월 15일생 1981년 2월 아주대학교 전자공학과(공학사) 1983년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학 석사) 1987년 8월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학 박사) 1987년 9월-1990년 8월 한국전자통신연구소 전임연구원 1990년 9월 현재 아주대학교 전자공학부 조교수, 부교수, 교수 1997년 3월 1998년 2월 미국 플로리다 대학교 대우교수 주 관심 분야는 광통신용 반도체 레이저 및 부품, 광전 소자 등임