

論文99-36D-12-8

DFB 레이저의 통합된 설계 변수로서의 광자 분포 중심Ⅱ : $\lambda/4$ 위상 천이 구조

(Center of Photon Mass as a Unified Design Parameter Ⅱ
: Quarter Wavelength Shifted DFB Lasers)

金成翰*, 金相培**

(Sung Han Kim and Sang Bae Kim)

요 약

QWS-DFB 레이저에서 단일 주파수 동작 안정성을 결정하는 문턱 이득 차이와 축 방향 광자 분포 균일성을 동시에 나타내는 통합된 설계 변수로서 광자 분포 중심을 정의하고, 이 광자 분포 중심이 문턱 이득 차이와 광자 분포의 균일성과 어떻게 연관되는지를 유효 굴절률 전달 매트릭스 방법으로 보였다. 또, 이로부터 단일 주파수 동작 안정성을 최대화하는 설계 원칙을 제시하였다. 그리고 이 설계 원칙을 적용한 예로서 100% 단일 주파수 동작 수율을 보이는 결합계수의 범위를 넓힌 sampled grating QWS-DFB 레이저 구조를 제안하였다. 이 레이저 구조는 단일 주파수 동작을 하는 결합계수의 범위가 좁다는 QWS-DFB 레이저의 문제점을 해결하는 길을 제시하였다.

Abstract

Center of photon mass, defined as the center of axial photon distribution in each half, is proposed as a unified design parameter in quarter wavelength shifted(QWS) DFB lasers. Shown is the way the parameter is related to the threshold gain difference and uniformity in axial photon density, which determine single-frequency stability of DFB lasers. Also, a general rule for single-frequency DFB laser design is presented. Using the design rule, we propose a sampled grating QWS-DFB laser that has a wider κL range of 100% single-frequency yield.

I. 서 론

저 반사면-고 반사면 구조의 DFB 레이저에서 공진기 길이로 정규화된 축 방향 광자 분포의 중심으로 정의되는 광자 분포 중심(CPM, center of photon mass)이 문턱이득과 광자 밀도 비, 나아가서 문턱이득 차이

를 동시에 잘 나타내는 통합된 설계 변수로서 쓰일 수 있음이 보고되었다.¹⁾ 즉 CPM은 문턱 이득과 반비례 관계에 있는데, 그 것은 광자가 고 반사면으로 치우쳐 있을수록 반사면 손실이 작기 때문이다. 또, CPM이 0.5일 때에 광자 분포가 가장 균일하게 되며, 그 이유는 이 때에 광자분포가 좌우 대칭이 되는데 κL 이 작을 때에는 광자 분포가 단조 증가 또는 단조 감소 함수의 형태로 주어지므로 좌우 대칭이라는 것은 광자분포가 상수, 즉 평탄함을 의미하기 때문이다. 특히 주 모드와 결 모드 사이의 문턱이득 차이는 주 모드의 CPM ξ_0 과 결 모드의 CPM ξ_1 의 비율 ξ_0/ξ_1 과 비례 관계에

* 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

있다. 이처럼 지금까지는 서로 무관한 것으로 알려졌던 문턱이득 차이와, 축 방향 광자 밀도의 최대 값과 최소 값의 비율로 정의되는 광자 밀도 비가 CPM이라는 통합된 변수를 통하여 서로 관계 지워지게 되었다. 따라서 DFB 레이저의 단일 주파수 동작 안정성을 높이려면 주 모드의 CPM ξ_0 은 0.5 근처에, 곁 모드의 CPM ξ_1 은 최소화하여야 한다.^[1]

이 논문의 목표는 이러한 CPM의 개념을 현재 실용화가 추진되고 있는 파장 다중화 방식 광통신에 가장 적합한 광원인 Quarter Wavelength Shifted (QWS)-DFB 레이저에도 적용할 수 있음을 보이는 데에 있다. QWS-DFB 레이저는 두 거울면을 저 반사 처리하기 때문에 공진기 가운데 위상 천이를 가상의 고 반사면으로 생각하여, 두 개의 저 반사면-고 반사면 DFB 레이저가 맞붙어 있는 구조로 생각할 수 있다.^[2] 그러므로 이 두 개의 저 반사면-고 반사면 구조에서 CPM을 따로따로 구하여 평균을 하면, 저 반사면-고 반사면 구조의 CPM과 똑같은 의미와 역할을 가질 것으로 기대할 수 있다. 이렇게 정의된 CPM이 실제로 저 반사면-고 반사면 구조 DFB 레이저의 CPM과 똑같은 의미와 역할을 가짐을 이 논문에서 보였다. 먼저 II 장에서는 QWS-DFB 레이저에서 CPM을 정의하고 그 의미를 살펴보았다. 이어서 III 장에서는 앞장에서 제시된 설계 방법론에 맞추어 sampled grating QWS-DFB 레이저를 설계하여 단일 주파수 동작 수율이 100%가 되는 정규화된 결합계수 xL 의 범위를 넓힌 구조를 제안하였으며, 이 결과를 토대로 IV 장에서 결론을 맺었다.

II. $\lambda/4$ 위상 천이 DFB 레이저에서 광자 분포 중심

앞에서 언급한 바와 같이 QWS-DFB 레이저는 양 거울면을 저 반사면으로, 위상 천이를 가상의 고 반사면으로 하는 두 개의 저 반사면-고 반사면 구조의 DFB 레이저를 맞붙여 놓은 것으로 생각할 수 있다. 그러므로, 저 반사면-고 반사면 구조의 DFB 레이저에서 정의한 CPM을 각각의 반쪽에 그대로 적용하여 평균하면 QWS-DFB 레이저에서도 통합된 설계 변수로서의 CPM을 정의할 수 있으리라 기대된다. QWS-DFB 레이저의 CPM ξ 를 정규화된 형태로 다음과 같이 정의하기로 한다.

$$\xi \equiv \frac{1}{2} \left| \frac{\int_0^{L/2} z S(z) dz}{(L/2) \int_0^{L/2} S(z) dz} + \frac{\int_{L/2}^L (L-z) S(z) dz}{(L/2) \int_{L/2}^L S(z) dz} \right| \quad (1)$$

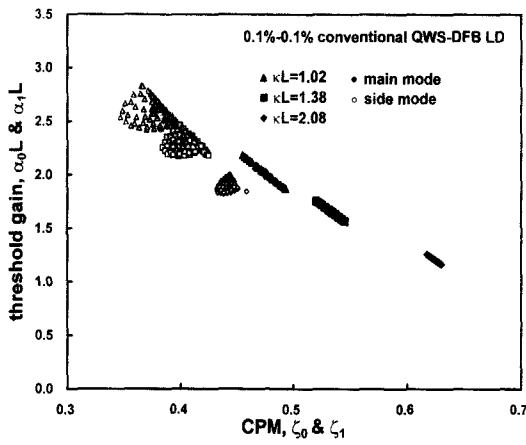
z : 왼쪽 거울면을 원점으로 한 축방향 좌표

$S(z)$: 축 방향 광자 분포

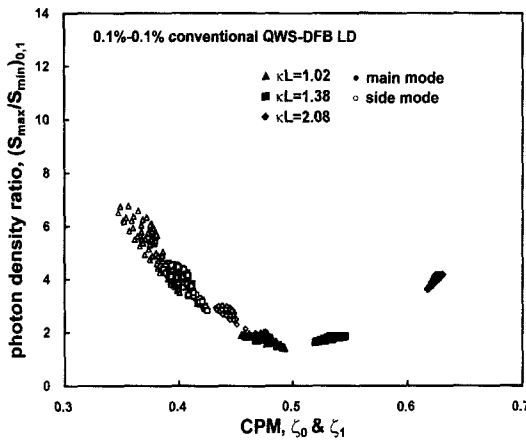
L : 공진기 길이

여기에서 괄호 안의 두 항은 단순히 양쪽 거울면을 저 반사면으로 하는 반쪽 저 반사면-고 반사면 구조의 CPM임을 알 수 있다.

그림 1 (a)는 주 모드와 곁 모드의 문턱 이득과 CPM 사이의 상관 관계를 보여준다. DFB 레이저 구조는 separate confinement buried heterostructure로, 활성층과 separate confinement 층은 에너지 갭 파장이 각각 1.55, 1.3 μm 이며, 회절격자는 separate confinement 층 아래 기판에 만들어진다. 또, 공진기의 정 가운데에 회절격자 반주기를 첨가하거나 없애 $\lambda/4$ 위상 천이가 일어나도록 하였으며, 삼각함수 형태의 회절격자 주기는 Bragg 파장을 1.55 μm 에 맞추려고 0.23752 μm 로 하였고, 공진기 길이 L 은 300 μm 로 두었다. 또, 거울면의 잔유 반사율이 단일 주파수 동작 특성에 미치는 영향을 무시할 수 있을 정도로 작게 하기 위하여 두 거울면은 0.1% 저 반사 처리한 것으로 가정하였다. 소자 구조와 해석 방법에 대한 더 자세한 내용은 참고문헌 [1]에 기술되어 있다. 그림의 점들은 주어진 xL 값에서 QWS-DFB 레이저 양 거울면 회절격자 위상 12 \times 12 조합에 대하여 계산한 결과이다. 먼저 주 모드에 대한 두 변수 사이의 상관성이 매우 높아, 상관계수가 거의 -1이 됨을 볼 수 있다. 이 이유는 가상의 고 반사면인 위상 천이에서의 회절격자 위상이 일정하기 때문이다. 물론 음의 상관 관계를 갖는 것은 광자 분포가 가상의 고 반사면인 위상 천이 부분에 집중될수록 거울면 손실이 작아져 문턱이득이 작아지기 때문이다. 한편, 곁 모드에 대한 상관성은 정하여진 xL 값에서는 나쁘지만, xL 이 변함에 따른 음의 상관성은 좋다. 이처럼 곁 모드에서 상관성이 나쁜 것은 가상의 고 반사면인 위상 천이의 위상이 곁 모드에 대하여는 상쇄간섭이 일어나기 때문이다. 그렇지만, 전체적으로는 CPM과 문턱이득 사이의 상관성은 높아 CPM이 문턱이득을 나타내는 척도로 사용될 수 있다. 그러므로 주 모드의



(a)



(b)

그림 1. 거울면 잔유 반사율이 0.1%인 균일 회절격자 (conventional)QWS-DFB 레이저에서 주모드 (0)와 결모드(1)의 (a) 문턱 이득과 광자 분포 중심(CPM) (b) 광자 밀도 비와 광자 분포 중심 사이의 상관 관계

Fig. 1. (a) Correlation between threshold gain and center of photon mass, and (b) correlation between photon density ration and center of photon mass for main and side modes in the QWS-DFB laser with residual facet reflectivity of 0.1%.

CPM과 결 모드의 CPM의 비율인 ζ_0 / ζ_1 은 문턱 이득 차이의 척도로 쓰일 수 있다. 그림 1 (a)에서 xL 값이 커질수록 데이터 점들이 모임에 주목할 필요가 있는데, 이는 xL 값이 커지면서 거울면 위상에 따른 랜덤 반사의 영향이 줄어들기 때문이다.

그림 1 (b)는 고출력 동작에서 단일 주파수 동작 안

장성을 결정하는 광자 밀도 비와 CPM 사이의 상관관계를 보여준다. 저 반사면-고 반사면 구조에서와 마찬가지로 CPM이 0.5일 때 광자 밀도 비가 1 가까이로 되어, 축 방향 광자 분포가 가장 균일하게 되며, 0.5에서 벗어날수록 광자 밀도 비가 커지면서 불균일하게 됨을 알 수 있다. 이는 (1)의 CPM 정의식에서 광자 밀도가 상수이면 CPM이 0.5가 됨을 생각하면 쉽게 이해할 수 있다. 여기에서 그림 1 (b)의 높은 상관성의 원인에 대하여 생각하여 볼 필요가 있다. CPM이 0.5라는 것은 QWS-DFB 레이저 반쪽에서 광자 분포가 좌우 대칭임을 의미한다. 그러므로, 좌우 대칭이면서 광자 분포가 불균일할 가능성은 얼마든지 있다. 그러나, κL 이 작을 때에는 광자 분포가 거의 단조 증가 또는 단조 감소의 형태를 띄므로, CPM이 0.5이면서 광자 분포가 심하게 불균일한 경우는 없다. 이처럼 CPM은 xL 이 작을 때 광자 분포가 단조 증가 또는 단조 감소 함수일 때에만 의미가 있어, QWS-DFB 레이저에서는 $xL / 2$ 이 2, 즉 xL 이 4 이하일 때에만 유용하다. 그러나, 이 제약 조건이 CPM의 유용성을 해치지 않는데, 그것은 QWS-DFB 레이저에서 실제로 유용한 xL 의 범위는 1에서 2 사이이기 때문이다. 이 영역을 벗어나면 단일 주파수 동작 수율은 급격히 떨어진다. 그림 1 (b)에서도 알 수 있는 것처럼 이 영역을 벗어나면 축 방향 광자 분포가 불균일하여 spatial hole burning^[3] 현상이 일어나 결 모드 억제율이 나빠지기 때문이다.

이상에서 살펴본 것처럼 CPM은 QWS-DFB 레이저의 단일 주파수 동작 특성을 결정하는 가장 중요한 두 요소인 문턱 이득 차이와 광자 밀도 비를 모두 나타내는 통합된 설계 변수로 사용할 수 있다. 또, 서로 독립적이라고 생각되었던 문턱 이득 차이와 광자 밀도 비가 어떻게 연관되는지를 보여준다. 특히 단일 주파수 동작을 위한 회절격자 구조 설계 방향을 제시하는데, 단일 주파수 동작 특성을 향상시키려면 주 모드의 CPM ζ_0 은 0.5 근처에 두어 spatial hole-burning을 막고 결 모드의 CPM ζ_1 은 최소화하여 문턱 이득 차이를 최대화하여야 한다. 이렇게 주 모드와 결 모드의 CPM을 독립적으로 조절하려면 조절 가능한 회절격자 구조 변수가 하나 더 있어야 하는데, 그림 2에 보인 sampled grating을 이용한 회절격자 결합 계수의 위치에 따른 변화가 그 하나의 방법이 된다. 이 부분에 대하여 다음 장에서 다루기로 한다.

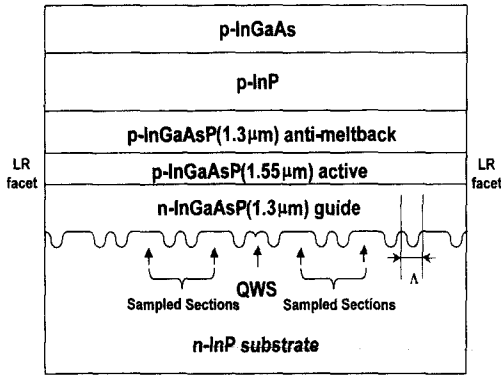
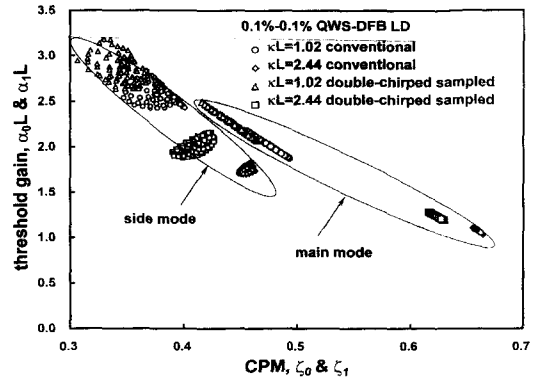


그림 2. sampled grating QWS-DFB 레이저의 축방향 단면도
 Fig. 2. Schematic structure of the sampled grating QWS-DFB laser.

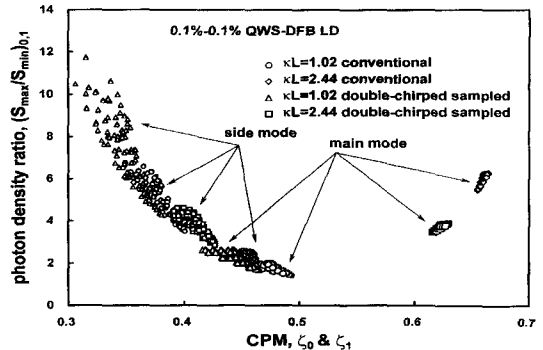
III. 광자 분포 중심을 이용한 sampled grating 레이저 설계

그림 3은 sampled grating을 첨가함으로써 주 모드와 결 모드의 CPM을 단일 주파수 동작 안정성이 향상되도록 조절할 수 있음을 보여주는 예이다. double-chirped sampled라고 이름지은 이 구조에서는 길이가 20 회절격자 주기인 sampled section을 가운데 위상 천이를 중심으로 좌우 대칭이 되도록 총 10 개를 첨가하였는데, 왼쪽 반쪽에서 sampled section 사이의 간격은 20, 20, 280, 108 회절격자 주기이며, 마지막 sampled section과 위상천이 사이의 거리는 20 주기이다. 그러므로 sampled section의 총 길이와 공진기 길이의 비율로 정의되는 sampling ratio는 약 0.16이다. 그리고 sampled section이 없는 회절격자의 결합계수에 공진기 길이를 곱한 명목상의 정규화된 결합계수 xL 은 sampled section이 포함되어 있는 sampled grating의 정규화된 유효 결합계수보다 1.19배정도 크다. 그림 3 (a)에서 sampled grating을 첨가함으로써 CPM은 감소하고, 따라서 문턱이득은 증가함을 볼 수 있다. 이는 sampled section을 첨가함으로써 유효 결합계수가 감소하였기 때문이다. 그런데, 명목상의 결합계수 xL 이 2.44일 때에는 결 모드의 CPM이 주 모드의 CPM보다 더 많이 줄어들음을 볼 수 있다. 이에 따라 문턱이득 차이도 증가하였다. 또, 그림 3 (b)를 보면 xL 이 2.44일 때에는 주 모드의 CPM은 0.5를 향하여 줄어들어 광자 밀도 비가 줄어들었음을 알 수 있다. 실제로 광자 밀도 비는 평균

2.2 정도 감소하였고 문턱이득 차이 $\Delta\alpha L$ 은 평균 0.054 정도 증가하여 단일 주파수 동작 안정성이 향상되었다. 반면에 xL 이 1.02일 때에는 CPM은 주 모드와 결 모드가 비슷한 정도로 줄어들어 문턱이득 차이의 향상은 작고 오히려 주 모드의 CPM이 0.5에서 더 많이 벗어남으로써 광자 밀도 비가 커져 단일 주파수 동작 특성은 나빠졌다.



(a)



(b)

그림 3. 거울면 잔유 반사율이 0.1%인 QWS-DFB 레이저에서 double-chirped sampled grating의 삽입에 따른 주 모드(0)와 결 모드(1)의 (a) 문턱 이득과 광자 분포 중심(CPM) (b) 광자 밀도 비와 광자 분포 중심 사이의 상관 관계 비교

Fig. 3. Effect of the sampled grating on (a) correlation between threshold gain and center of photon mass, and (b) correlation between photon density ration and center of photon mass for main and side modes.

그림 4에는 xL 이 2.44일 때에 주 모드와 결 모드 CPM의 변화를 직접 알아보고 축 방향 광자 분포를 나타냈다. 하나의 예로서 두 거울면에서의 회절격자 위

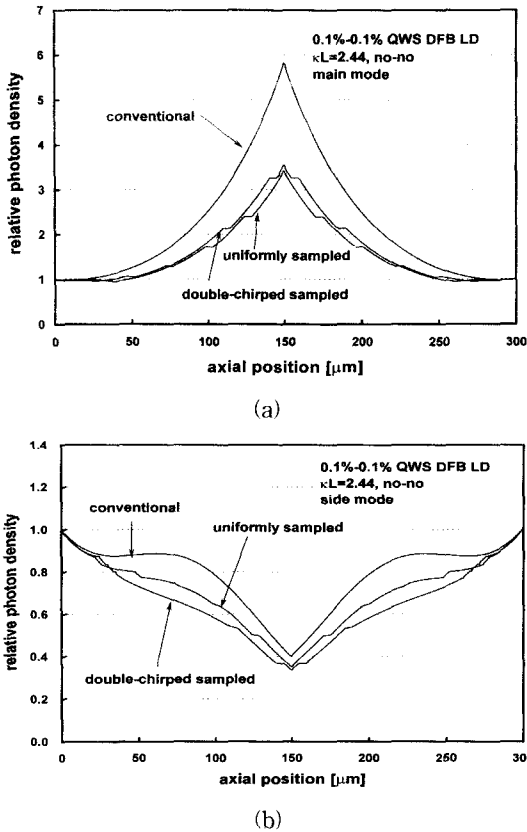


그림 4. $\kappa L = 2.44$ 일 때, 균일 회절 격자, 균일하게 샘플링된 회절격자, 불균일하게 샘플링된(double-chirped sampled)회절격자 QWS-DFB 레이저의 (a) 주 모드와 (b) 곁 모드 축방향 광자 분포 비교

Fig. 4. Comparison of axial photon distribution of (a) main and (b) side modes in conventional, uniformly sampled, and double-chirped sampled grating QWS-DFB lasers when κL is 2.44.

상이 삼각함수 회절격자의 마루에 해당되는 경우를 보였다. 그림에서 불연속하게 나타나는 부분들이 sampled section에 해당된다. 그림 4 (a)에서 보면 sampled section이 없는 conventional 구조에 비하여 double-chirped 구조나 sampled section 사이 간격만 균일하게 바꾼 uniformly sampled 구조 모두에서 광자 분포는 많이 균일해졌음을 알 수 있으며, 그림 3에서처럼 CPM도 줄어들었음을 알 수 있다. 또, double-chirped 구조에서 CPM이 조금 더 줄어들었음을 볼 수 있다. 반면에 그림 4 (b)의 곁 모드 광자 분포를 보면, CPM은 double-chirped 구조에서 가장 작고, uniformly sampled 구조에서 조금 더 크며, conventional 구조에서 가장 큼을

알 수 있다. 그러므로 주 모드와 곁 모드 CPM의 비율 ξ_0/ξ_1 은 double chirped 구조에서 커서 문턱이득 차이도 크게 됨을 알 수 있다. 이렇게 sampled section 사이의 간격을 조절함으로써 DFB 레이저의 특성을 원하는 방향으로 변화시킬 수 있다는 데에 sampled grating의 중요성이 있다.

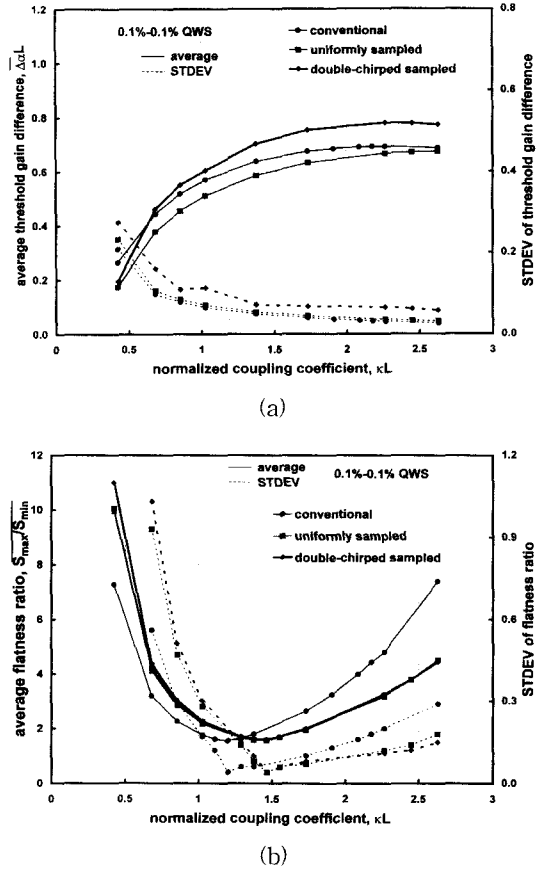


그림 5. 균일 회절격자, 균일하게 샘플링된 회절격자, 불균일하게 샘플링된 회절격자 QWS-DFB 레이저에서 κL 에 따른 (a) 문턱이득 차이와 (b) 광자 밀도 비의 평균값과 표준 편차의 변화

Fig. 5. Dependence on κL of the average and standard deviation of (a) threshold gain difference and (b) photon density ratio in conventional, uniformly sampled, and double-chirped sampled grating QWS-DFB lasers.

그림 5 (a)는 세 구조의 문턱이득 차이의 평균과 표준편차를, 그림 5 (b)는 광자밀도 비의 평균과 표준편차를 κL 에 따라 나타내었다. double-chirped 구조의 문턱이득 차이는 대체로 conventional 구조보다 크고,

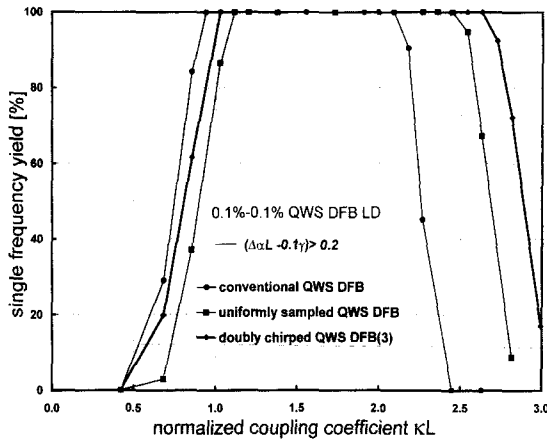


그림 6. 균일 회절 격자, 균일하게 샘플링된 회절격자, 불균일하게 샘플링된 회절격자 QWS-DFB 레이저의 κL 에 따른 단일 주파수 동작 수율 비교
Fig. 6. Comparison of single-frequency yield for conventional, uniformly sampled, and double-chirped sampled grating QWS-DFB lasers.

κL 이 클 때의 광자 밀도 비는 conventional 구조보다 작고 uniformly sampled 구조와 거의 같아, κL 이 클 때에 단일 주파수 동작 안정성이 향상될 수 있음을 알 수 있다. 이 κL 에 따른 단일 주파수 동작 수율을 그림 6에 보였다. 사용된 단일 주파수 동작 조건은 $\Delta aL - 0.1\gamma > 0.2$ 로, ΔaL 은 문턱이득 차이이고, γ 는 광자 밀도 비 S_{max}/S_{min} 이며 -0.1γ 는 spatial hole burning에 따른 문턱이득 차이의 감소를 나타낸다. 이렇게 구하여진 단일 주파수 동작 조건을 이용하여 구한 수율은 실험 결과와 잘 일치한다.^[1] 세 구조를 비교하여 보면, κL 이 작을 때에는 conventional 구조가 좋은 반면, κL 이 클 때에는 uniformly sampled 구조가 좋아 100% 수율을 보이는 κL 의 범위가 conventional 구조에 비하여 약 16% 정도 넓어진다. 또, double-chirped 구조에서는 κL 이 작을 때에는 conventional 구조에 가깝고, κL 이 클 때에는 uniformly sampled 구조보다 더 좋아 100% 수율을 보이는 κL 의 범위가 conventional 구조에 비하여 약 40% 정도 넓어진다. uniformly sampled 구조에서 100% 수율을 보이는 κL 의 범위가 넓어지는 것은 sampling 때문에 유효 κL 이 sampling ratio만큼 결합계수 κ 의 변화에 덜 민감하기 때문으로, sampling ratio인 0.16만큼 κL 범위가 넓어진 것이다. double-chirped 구조에서는 uniformly sampled 구조의 16%보다 24% 정도 더 넓어졌는데, 그것은 sampled grating

을 이용하여 ξ_0 은 0.5에 가깝게, ξ_1 은 더 작게 조절할 수 있었기 때문이다. double chirped 구조에서 κL 의 상대 오차 허용 범위 $\pm 50\%$ 는 conventional 구조의 $\pm 30\%$, 실험적으로 얻어지는 κL 의 상대 오차 $\pm 25\%$ 보다 훨씬 넓은 것으로, 이로써 QWS-DFB 레이저의 가장 큰 문제점 가운데 하나였던 좁은 κL 범위의 문제를 해결하는 길이 열리게 된 것이다. 여기에서 제시된 double chirped 구조는 최적의 구조가 아니므로 sampled grating 구조 변경을 통하여 더 나은 성능의 레이저 구조 설계가 가능하다.

IV. 결론

QWS-DFB 레이저에서 단일 주파수 동작 안정성을 결정하는 문턱이득 차이와 광자 밀도 비와 그 연관성을 동시에 나타내는 통합된 설계 변수로서 CPM을 정의하고, CPM과 발진 모드의 문턱 이득, 광자 밀도 비, 문턱 이득 차이 사이의 상관관계를 보였다. 문턱 이득 차이는 주 모드와 결 모드 CPM의 비율 ξ_0/ξ_1 과 비례 관계에 있으며, 광자 밀도 비는 CPM이 0.5일 때에 가장 균일하다. 그러므로 단일 주파수 동작 안정성을 향상시키려면 주 모드의 CPM은 0.5 근처에, 결 모드의 CPM은 가능한 한 작게 하여야 한다. 이렇게 ξ_0 과 ξ_1 을 독립적으로 최적화 하려면 조절 가능한 회절격자 구조 변수가 더 필요한데, sampled grating이 그 수단으로 도입되었다. 이 sampled grating과 CPM을 이용한 설계 방법론을 QWS-DFB 레이저 구조에 적용함으로써 100% 단일 주파수 동작 수율을 보이는 κL 의 범위를 40% 정도 넓혔다. 이렇게 κL 의 상대 오차 허용 범위를 $\pm 50\%$ 로 늘림으로써 QWS-DFB 레이저의 가장 큰 어려움의 하나였던 κL 의 상대 오차 허용 범위가 좁은 문제를 해결할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] "DFB 레이저의 통합된 설계 변수로서의 광자 분포 중심 I: 저 반사면-고 반사면 구조," 이 논문의 제 1부
- [2] C. H. Henry, "Performance of distributed feedback lasers designed to favor the energy gap mode," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 21, no. 12, pp. 1913-1918, Dec. 1985.

- [3] H. Soda, Y. Kotaki, H. Sudo, H. Ishikawa, S. Yamakoshi, and H. Imai, "Stability in single longitudinal mode operation in InGaAsP/InP phase adjusted DFB Lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol. 23, no. 6, pp. 804-814, June 1987.
- [4] M. Okai, "Spectral characteristics of distributed feedback semiconductor lasers and their improvements by corrugation-pitch-modulated structure," *J. Appl. Phys.*, vol. 75, no. 1, pp. R1-R29, Jan. 1994.
- [5] 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.

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 선임연구원 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