

論文96-33A-7-27

# $\lambda/4$ 위상천이 DFB 레이저 다이오드에서 grating 구조상의 비이상성이 발진특성에 미치는 영향

## (Effects of Structural Nonidealities on the Lasing Characteristics of $\lambda/4$ Phase-Shifted DFB Lasers)

曹鍾涉\*, 金相培\*\*

(Jong Sup Cho and Sang Bae Kim)

## 요 약

도파로 구조에 따른 손실변화 및 물질분산, 도파로 분산의 영향을 고려한 유효굴절률 방법과 전달 매트릭스 방법을 이용하여 비이상적인 회절격자를 포함한  $\lambda/4$  위상천이 DFB 레이저를 해석하였다. 중앙의  $\lambda/4$  위상천이 지점에서 회절격자가 뭉그러진 경우에는 성능의 저하는 거의 없는 반면에 광자의 집중도가 낮아져 spatial hole-burning의 영향이 다소 줄어들는다. 또 위상천이 오차는  $\pi/4$ 보다 작아야 거울면 잔유 반사율이 0.7%일 때에도 단일 모드 동작이 가능하다. 위상천이 지점이 공진기의 정중앙에서 벗어나면 발진 문턱이득 차이가 감소하며 이 감소율을 10% 이하로 하기 위한 허용오차는 공진기 길이의 9%이다.

## Abstract

$\lambda/4$  phase-shifted DFB lasers with nonideal grating structure have been studied by using an effective-index transfer matrix method where material dispersion, waveguide dispersion and waveguide-structure dependent loss are taken into consideration. Nonideal grating structure in the center phase-shift region does not incur serious degradation of laser characteristics. Phase-shift error from the ideal shift of  $\pi$  causes a decrease in the threshold gain difference and lasing wavelength shift and should be less than  $\pi/4$  when residual facet reflectivity is 0.7%. Also, positional error of the phase-shift should be less than 9% of the cavity length in order for the threshold gain difference to be decreased less than 10%.

## I. 서론

$\lambda/4$  위상천이 DFB 레이저 다이오드는 그림 1과 같이 공진기 중앙의 회절격자를 반주기, 즉 Bragg 파장  $\lambda$ 의 1/4에 해당하는 길이를 더하거나 빼준 구조이다. 이 위상천이를 중심으로 하는 공진으로 Bragg 모

드가 주모드로서 발진한다. 따라서 단일 모드 동작특성이 우수하여 고속 변조용 광통신시스템의 광원으로 많이 사용된다. 그러나  $\lambda/4$  위상천이 된 grating 구조를 만들기가 매우 까다로운 단점이 있다. 즉 holography 방법이나 electron-beam lithography법, photomask self-interference법 등을<sup>[1]</sup> 사용하여 grating을 만들 때 위상천이지점에 비이상적인 grating 구조가 나타나고 위상천이 자체도 정확히  $\lambda/4$ 가 되지 못하고 오차가 발생할 수 있다. 또 레이저 다이오드를 cleaving할 때 위상천이 지점이 공진기의 정중앙에 위치하도록 제어하기가 매우 어렵다. 더욱이 이상적인 구조에서도 거울면에 잔유 반사율이 존재할 때 거울면에서의 grating

\* 學生會員, \*\* 正會員, 亞洲大學校 電氣電子工學部  
(Division of Elec. and Elec. Eng., Ajou Univ.)

※ 이 논문 연구는 한국전자통신연구소의 연구비 지원으로 이루어졌음.

接受日字:1995年9月11日, 수정완료일:1996年5月13日

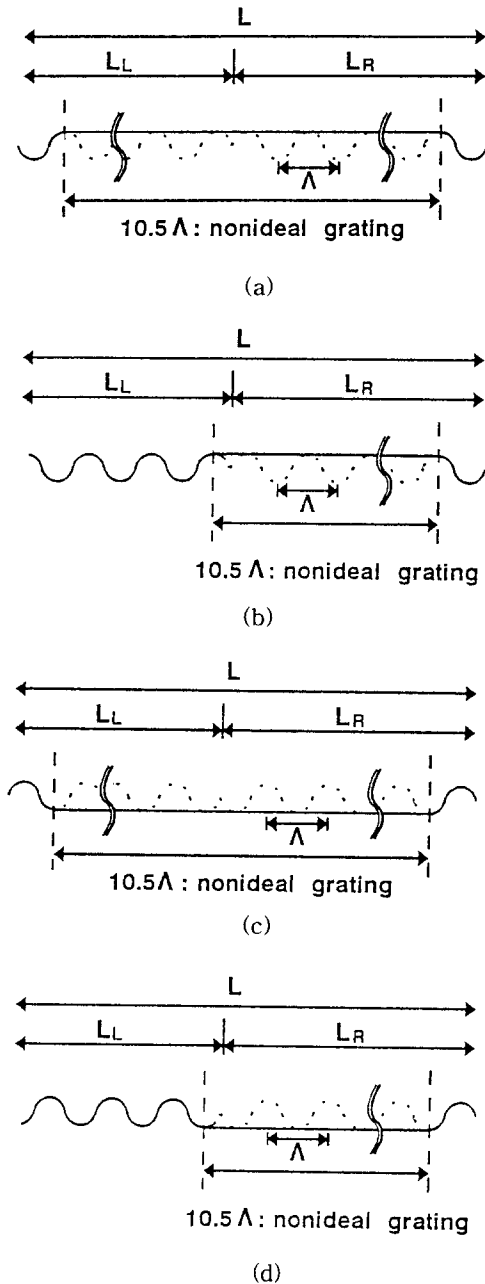


그림 1.  $21\lambda/2$  구간의 비이상적인 grating 구조  
 (a)  $+\cos$  grating, symmetric, (b)  $+\cos$  grating asymmetric  
 (c)  $-\cos$  grating, symmetric, (d)  $-\cos$  grating asymmetric.

Fig. 1. Nonideal grating structures with the length of  $21\lambda/2$  at the phase-shift region.

위상에 따라 그 단일모드 동작 특성이 크게 변하고 높

은 출력에서 위상천이 지점에 광자가 집중함으로써 발생하는 spatial hole burning에 따라 그 특성이 저하된다.<sup>[1]</sup>

이 논문의 목표는  $\lambda/4$  위상천이 DFB 레이저의 grating을 얼마나 잘 만들어야 하는지를 알아내는 데 있다. 이를 위해서 도파로 구조에 따른 손실변화 및 물질분산, 도파로 분산의 영향을 고려한 유효 굴절률 방법과 전달 매트릭스 방법을<sup>[2]</sup> 이용해서 공진기 내부 광자분포가 가장 균일한 경우인  $\kappa L=1.25$ 인<sup>[3]</sup> 정현파 형태 회절격자의  $\lambda/4$  위상천이 DFB 레이저에서 제작 공정상 나타날 수 있는 비이상적인 grating 모습의 영향을 해석하였다. 이를 바탕으로 거울면의 grating 위상변이에 따른 발진특성 저하를 고려하여 공정요건을 도출해 냈다.

II장에서는 먼저  $\lambda/4$  위상천이 지점에 비이상적인 grating이 나타났을 때 문턱이득과 광자분포의 변화를 고찰하고 III장에서 위상천이 오차의 영향을 살펴본다. IV장에서는  $\lambda/4$  위상천이 지점의 위치에 따른 발진특성에 대해 조사하고 V장에서 결론을 맺는다.

### II. $\lambda/4$ 위상천이 부분의 비이상적인 회절격자 모양이 단일모드 동작 특성에 미치는 영향

$\lambda/4$  위상천이 DFB 레이저를 제작할 때 가장 어려움을 겪는 부분은 정밀한 grating pattern을 만드는 공정이다. holography법이나 electron-beam lithography법, photomask self-interference법 등을<sup>[1]</sup> 통해 주로 grating을 제작하는데 공정 특성상  $\lambda/4$  위상천이 부분에 비이상적인 형상이 만들어지기 쉽다. 이러한 비이상적인 형상은 일정 길이를 grating이 없는 모습으로 모델링할 수 있고, grating의 마루를 일정 구간 동안 유지하는 것(그림 1(a), (b))과 골을 유지하는 것(그림 1(c), (d))으로 나누어 볼 수 있다. 이는 다시  $+\cos$  grating에서 비이상적인 grating이 공진기의 정중앙에 있는 그림 1(a) 구조와 정중앙을 기준으로 한 쪽으로 치우쳐져 있는 그림 1(b)와 같은 구조로 나눌 수 있다.  $-\cos$  grating일 때의 그림 1(c), (d)는 각각 그림 1(a), (b)에 대응된다. 이 때 모든 경우에 있어서 위상천이부에서 좌우 거울면까지의 거리 비  $L_L:L_R$ 은 1:1로서 위상천이는 공진기의 정중앙에서 일어남을 가정한다. 이상의 모델들을 양 거울면이 완전 무반사 코팅된 경우와 0.7%의 잔유반사율이 존재하는 경우에 각

각 해석하였다. 잔유반사율을 0.7%로 한 것은 이상적인  $\lambda/4$  위상천이 DFB 레이저에서는 100% 단일모드 동작 수율을 보장하는 잔유 반사율 값이기 때문이다.<sup>[1]</sup> 모델들 중에서 잔유 반사율이 0.7%일 때는 각 거울면에서의 grating 위상을 grating 주기  $\Lambda$ 의  $1/8$ 씩 변화시켜 가며 모두 64가지 경우에 대해 해석하였다.

그림 2(a)는 비이상적인 grating 영역의 길이에 따른 문턱이득과 발진파장의 변화를 그린 것이다. 양 거울면이 완전 무반사 코팅된 +cos 구조에서 비이상적인 grating이 정중앙에 있을 경우에 이상적인 위상천이에 비해 각 모드별 문턱이득은 거의 변화가 없으나 주모드인 0 모드의 발진파장은 비이상적인 grating의 길이가  $10.5\Lambda$ 일 때에  $0.17\text{\AA}$ ,  $\pm 1$  모드는  $0.07\text{\AA}$  단파장 쪽으로 천이 되었고  $40.5\Lambda$ 일 때에는 0모드  $0.61\text{\AA}$ ,  $+1$  모드  $0.29\text{\AA}$ ,  $-1$  모드  $0.31\text{\AA}$  단파장으로 천이 되었다. 이는 유효 굴절률이 비교적 작은 구간이 grating 수십 주기 정도 계속되면서 위상천이오차가 생겨  $\lambda/4$  보다 약간 작은 위상천이가 일어난 때문이다. 그림 2(a)의 주모드 발진파장을 살펴보면 이런 경향이 비이상적인 grating의 길이에 따라 선형적으로 나타남을 알 수 있다. 뒤에 III장에서 위상천이오차  $\delta$ 이  $-1/8$ 일 때  $\delta=0$ 일 경우에 비해 주모드는  $2.85\text{\AA}$ ,  $\pm 1$  모드는  $1.21\text{\AA}$ ,  $1.32\text{\AA}$  단파장으로 shift된 것과 비교하면  $40.5\Lambda$ 의 길이가 약  $10\mu\text{m}$ 에 해당함을 고려할 때 비이상 grating 구간에 의한 위상천이 오차는 매우 작음을 알 수 있다. 여기에서 말한 위상천이 오차의 영향은 다음 장에서 자세히 살펴본다. -cos 구조에서는  $10.5\Lambda$  구간이 공진기의 정중앙에 있을 때 이상적인 grating 구조와 비교하여 0 모드는  $0.15\text{\AA}$ ,  $\pm 1$  모드는  $0.08\text{\AA}$  장파장 쪽으로 천이 되었고 이는 유효 굴절률이 비교적 큰 구간이 계속되면서 위상천이 오차가 생겨  $\lambda/4$  보다 다소 큰 위상천이가 일어났기 때문이다. 비이상적인 구간이 한 쪽으로 치우쳐져 있으면 정중앙에 있을 때와 비교하여 발진파장과 문턱이득은 거의 같으나 양 거울면으로 나가는 주모드의 파워비( $P_L/P_R$ )가  $\pm\text{cos}$  구조로 비이상적인 grating 길이가  $10.5\Lambda$ 일 경우에는 평균 약 1.1%,  $40.5\Lambda$ 일 경우에는 8.4%정도 줄어든다. 즉 치우쳐져 있는 방향으로 주모드의 광파워는 더 많이 나오는데 이는 비이상 grating이 한 쪽으로 치우쳐지면서 왼쪽과 오른쪽 grating 영역의 유효 길이가 달라지기 때문이다. 각 구조에서 문턱이득 차의 감소는 비이상 grating의 길이가  $40.5\Lambda$ 일 때에도 약 4.5% 이하로

무시할 수 있을 정도이다.

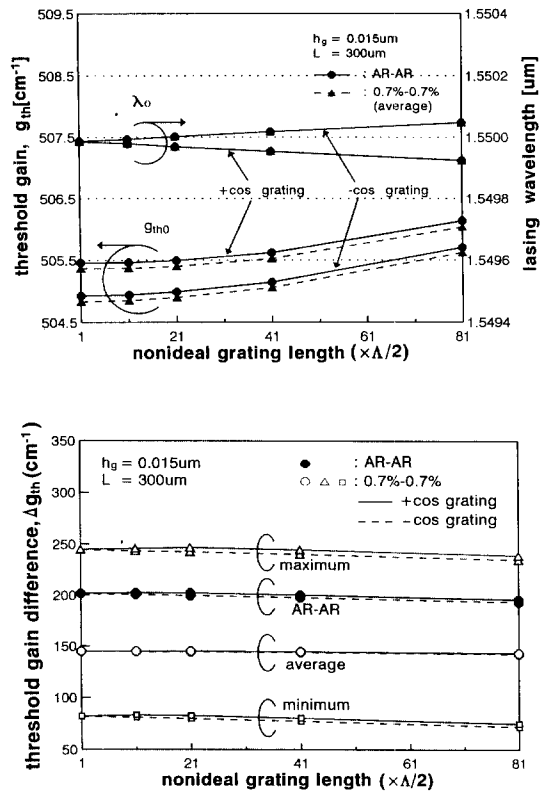


그림 2. 양 거울면이 완전 무반사 코팅된 경우와 잔유 반사율이 0.7%인 경우 비이상적인 grating의 길이에 따른 (a) 주모드의 발진파장과 문턱이득 변화(잔유 반사율이 0.7%일 때는 평균치), (b) 문턱이득 차이

Fig. 2. (a) Lasing wavelength and threshold gain of the main mode, and (b) threshold gain difference of  $\lambda/4$  phase-shifted DFB lasers with residual facet reflectivity of 0 and 0.7% and collapsed grating at the phase-shift region.

양 거울면의 잔유반사율이 0.7%일 때에 각 구조에서 주모드 발진파장 평균치는 완전 무반사 코팅되었을 때의 비이상적인 grating에 따른 변화와 일치하고 문턱이득 평균치도 거의 일치하고 있음을 그림 2(a)에서 알 수 있다. 그림 2(b)는 공진기 정중앙의 비이상적인 grating 길이에 따른 결모드와의 문턱이득 차이이다. 잔유 반사율이 0.7%인 레이저에서  $40.5\Lambda$  비이상 grating이 존재할 때 이상적인 경우에 비해 문턱이득 차의 최소값은 +cos 구조의 경우 약 9%, -cos 구조의

경우 약 13% 정도의 비교적 작은 범위에서 감소한다. 비이상 grating이 한 쪽으로 치우쳐져 있을 때는 역시 발진과장과 문턱이득 차의 변화는 정중앙에 있을 때와 거의 일치하나, 주모드의 출력비는  $\pm \cos$  구조 둘 다 비이상 grating의 길이가 10.5 $\lambda$ 일 때 평균 약 2.2%, 40.5 $\lambda$ 일 때는 약 8.4% 각각 감소한다.

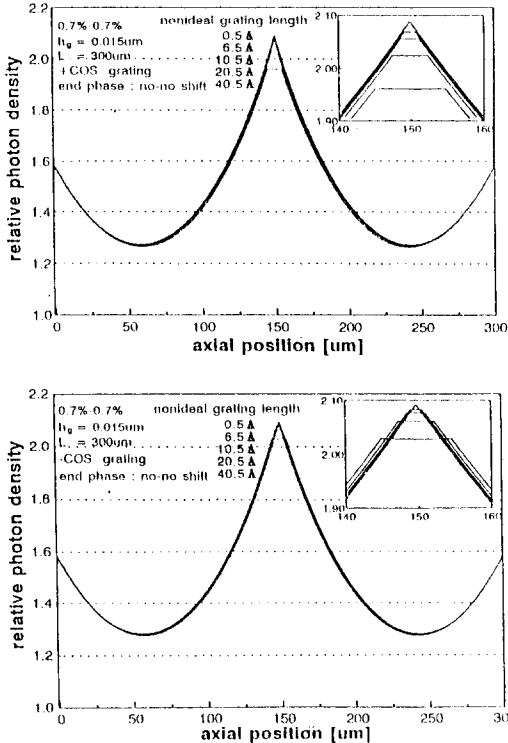


그림 3. 양 거울면의 잔유반사율이 0.7%이고 거울면에서의 grating 위상이 0일 때 (a) +cos grating 구조와 (b) -cos grating 구조에서 비이상적인 grating 주기에 따른 광자 밀도 비교

Fig. 3. Dependence of relative photon density on the nonideal grating length for the residual facet reflectivity of 0.7% in (a) +cosine and (b) -cosine grating.

그림 3은 양 거울면의 잔유 반사율이 0.7%이고 거울면에서의 grating 위상이 0-0(grating의 마루가 거울면에 위치한 경우임)일 때 +cos grating(그림 3(a))과 -cos grating(그림 3(b))의 구조에서 비이상적인 grating의 길이에 따른 오른쪽 거울면으로의 광출력을 일정하게 놓았을 때의 광자 분포이다. +cos 구조에서는 굴절률의 변화 때문에 비이상적인 주기가 증가함에 따라 전반적으로 밀도가 다소 감소하고 -cos 구조에서

는 증가하지만 두 구조 모두 중앙 위상천이 지점에서 광자의 집중도는 감소하고 있음을 볼 수 있다.

이상에서 살펴본 바와 같이 위상천이 지점에서 발생하는 비이상적인 grating은 위상천이 오차를 초래하지만  $\kappa L=0.15$ 일 때에 비이상적인 grating의 길이가 40.5 $\lambda$ 이내이면 위상천이 오차의 영향은 무시할 수 있을 정도로 작아서 발진 특성에는 거의 영향을 미치지 않는다. 오히려 비이상적인 구조의 길이가 증가할수록 중앙에서의 광자 집중도가 낮아져 spatial hole burning의<sup>[6]</sup> 영향을 다소 적게 받게 된다.

### III. 위상천이 오차의 영향

$\lambda/4$  위상천이 DFB 레이저는 제조상의 잘못으로 인해 구조적으로 grating의 위상천이 오차가 발생할 수 있을 뿐만 아니라 spatial hole burning의 영향으로 굴절률이 달라져서 effective한 위상천이 오차가 발생할 수 있다.<sup>[11]</sup> 이 장에서는  $\lambda/2 + \delta$ 의 위상천이가 발생했을 때 위상천이 오차  $\delta$ 를  $\lambda/8$  간격으로  $-\lambda/2$ 에서  $\lambda/2$ 까지 변화시켜 가며 발진특성을 고찰하였다.  $\lambda/4$  위상천이 DFB 레이저는 위상천이부에서 grating이  $\lambda/2$  길이만큼 더해지거나 빠져야 하는데 비하여 위상천이 오차가 있는 경우에는  $\lambda/2 + \delta$ 의 길이가 더해지거나 빼어진 것으로 놓았다.

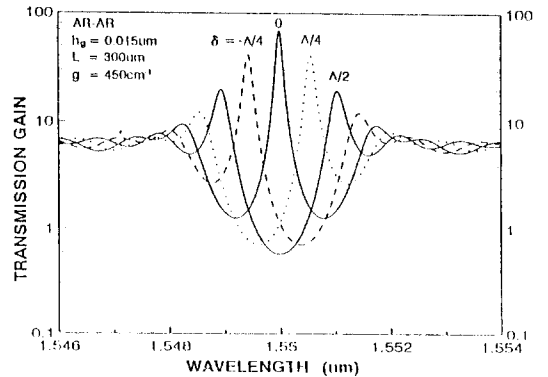


그림 4. 양 거울면이 완전 무반사 코팅되어 있고 위상천이 오차가 0 $\lambda$ ,  $\pm \lambda/4$ ,  $\lambda/2$ 인 DFB 레이저에서 활성층 이득 일 때의 투과이득 스펙트럼

Fig. 4. Transmission gain spectrum for the phase-shift error of 0 $\lambda$ ,  $\pm \lambda/4$ , and  $\lambda/2$  when the facets are perfectly antireflection coated and the gain is 450  $\text{cm}^{-1}$

그림 4는 양 거울면이 완전 무반사 코팅된 구조에서

이득을 문턱이득보다 작은  $450\text{cm}^{-1}$ 로 놓았을 때 위상천이 오차  $\delta$ 가  $-\Lambda/4, 0, \Lambda/4, \Lambda/2$ (Bragg파장에서의 위상으로는  $\pi/2, 0, \pi/2, \pi$ )인 DFB 레이저의 투과이득 스펙트럼이다.  $\delta$ 가 0일 때 즉, 이상적으로  $\lambda/4$  위상천이 된 구조에서부터 위상천이 오차가 증가할수록 주모드의 발진파장은 Bragg모드( $1.55\mu\text{m}$ )에서 멀어지며 결모드와의 투과이득 차이가 감소하여  $\delta$ 가  $\Lambda/2$ 인 구조 즉, 종래의 DFB 구조에서는 Bragg 모드에 stop band가 형성되고 그 옆의 두 개의 모드가 동시에 발진하는 균일 DFB 구조 고유의 발진특성을 보인다.

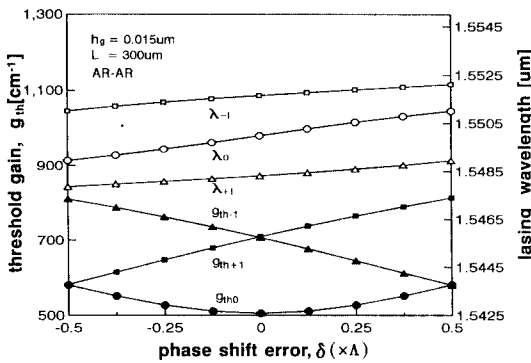


그림 5. 양 거울면이 완전 무반사 코팅되어 있을 때 위상천이 오차에 따른 각 모드별 발진파장과 문턱이득

Fig. 5. Lasing wavelength and threshold gain of each mode as functions of the phase-shift error in perfectly antireflection coated lasers.

그림 5는 위상천이 오차에 따른 각 모드별 발진파장과 문턱이득의 변화를 보인 것으로 위상천이 오차  $\delta$ 가  $-\Lambda/2$ 에서  $\Lambda/2$ 로 증가할수록 각 모드의 발진파장은 장파장 쪽으로 천이 됨을 알 수 있다. 이 때 주모드의 발진파장 변화가 결모드보다 크게 일어나서  $-1$  모드와의 간격이 점점 줄어든다. 문턱이득 차이는  $\delta=0$ 일 때 최대가 되고 위상천이 오차의 절대값이 커질수록 감소하다가  $\delta=\Lambda/2$ 인 구조, 즉 위상천이가 0(균일 grating DFB구조)이고 중앙에  $\Lambda$ 구간 동안 비이상 grating 구간이 있는 구조에서 0 모드와  $+1$  모드의 문턱이득이 거의 비슷하게 되어 단일 주파수 동작을 보장할 수 없게 된다. 이는 Okai의 계산결과( $\delta \geq 0$ 인 경우만 해석)<sup>[11]</sup>와 거의 일치하나 주모드의 문턱이득은 1차 함수적으로 증가하지 않는 차이점이 있다. 그리

고 참고문헌 [1]에서 균일 grating DFB 레이저에 해당하는 위상차이에서 0모드와  $+1$ 모드의 문턱이득 차이가 비정상적으로 크게 나타났음을 주의할 필요가 있다. 위상천이 오차에 따른 주모드와 결모드의 발진파장을 완전 무반사 코팅된 경우와 잔유 반사율이 0.7%일 경우에 대해서 그림 6에 보였다. 그림으로부터 모드간 발진파장은 위상천이 오차에 따라 1차 함수에 가까운 모양으로 변하고 있음을 알 수 있다. 잔유 반사율이 0.7%일 때의 평균치는 완전 무반사 코팅되었을 때의 값과 거의 일치하고, 거울면 grating의 위상에 따라 주모드의 경우 평균값을 중심으로  $1.4 \text{ \AA}$ 의 이내의 범위에서 분포한다. 단, 위상천이 오차가  $\pm \Lambda/2$ 인 경우에는 주모드가 거울면에서의 grating 위상에 따라 불규칙하게 바뀌기 때문에 평균값과 최대, 최소값이 직선상에 있지 않다.

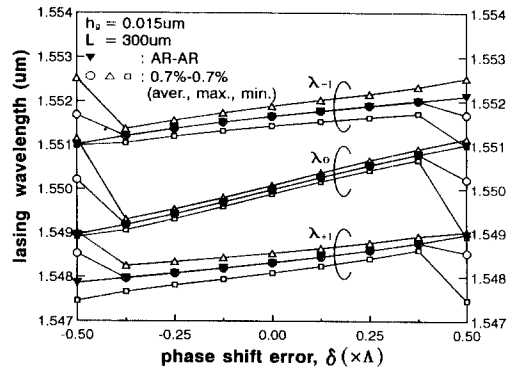


그림 6. 양 거울면이 완전 무반사 코팅되어 있을 때와 잔유 반사율이 0.7%-0.7%인 구조에서 위상천이 오차에 따른 각 모드의 발진파장

Fig. 6. Change in lasing wavelength of each mode with the phase-shift error when the residual facet reflectivity is 0.7%.

그림 7은 주모드와 결모드간의 문턱이득 차이를 도시한 것으로서 잔유 반사율이 0.7%인 구조에서는 거울면의 grating 위상에 따라 문턱이득 차이의 변화가 커서 단일 모드로 동작하는 위상천이 오차범위가 무반사 처리된 경우에 비해 매우 좁아졌음을 보여준다. 정규화 문턱이득 차이  $\Gamma \cdot \Delta g_{th} \cdot L$ 이 0.3이상일 때 단일모드 동작이 가능하다<sup>[4]</sup>고 보므로,  $\Delta g_{th}$ 가  $30\text{cm}^{-1}$ 이상에서 단일모드동작이 가능하다고 보면 단일모드 동작 수율이 100%가 되기 위해서는 위상천이 오차는  $\Lambda/8$ 보다 작아야 한다. 참고로 실제 소자가 동작할 때는 spatial

hole burning의 영향에 의해 effective 위상천이 오차가  $\lambda/4$ 까지 발생한다<sup>[1]</sup>. 이 논문의 계산방법을 그대로 적용하면 위상천이 오차가  $\lambda/4$ 까지 발생하더라도 100% 수율을 얻기 위해서는 잔유반사율은 0.3% 이내이어야 한다는 결론을 얻을 수 있다.

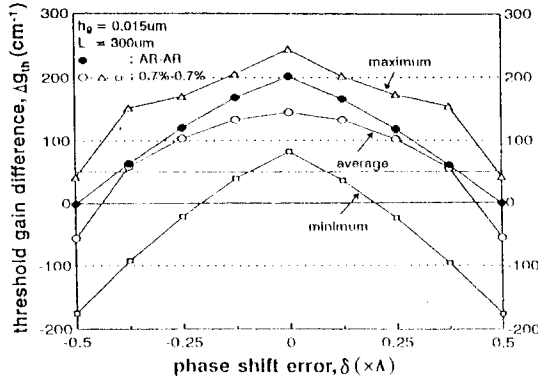


그림 7. 양 거울면이 완전 무반사 코팅되어 있을 때와 잔유 반사율이 0.7%-0.7%인 구조에서 위상천이 오차에 따른 문턱이득 차이

Fig. 7. Dependence of the threshold gain difference on the phase-shift error in perfectly antireflection coated and 0.7% low reflection coated lasers.

#### IV. $\lambda/4$ 위상천이 위치에 따른 영향

레이저 다이오드는 wafer에서 제작된 후 cleaving 공정을 통해 개별소자로 나뉘어진다. 이 때 cleaving은 기계적인 작용일 뿐만 아니라  $\lambda/4$  위상천이 지점을 직접 확인하기 어려우므로 위상천이가 공진기의 정중앙에 위치하도록 제어하는 것은 힘든 일이다. 또 출력비율을 조절하기 위해 의도적으로 위치를 바꾸기도 한다<sup>[5]</sup>. 따라서 이 장에서는 위상천이의 위치 오차에 따른 특성변화에 대해 살펴본다.

왼쪽과 오른쪽 거울면까지의 거리 비  $L_L:L_R$ 이 1:1, 1.25:1, 1.5:1, 2:1, 3:1인  $\lambda/4$  위상천이 DFB 레이저에서 활성층의 이득이  $450\text{cm}^{-1}$ 일 때의 투과이득 스펙트럼을 그림 8에 보였다. 양 거울면이 완전 무반사 코팅된 그림 8(a)의 경우 위상천이가 공진기의 정중앙( $L_L:L_R=1:1$ )에 있을 때 Bragg파장의 투과이득이 최대이고 위상천이 부분이 한 쪽으로 치우쳐 있을 수록 주 모드(0 모드)의 문턱이득이 증가하여 3:1 구조에서 +1

모드의 투과이득이 0 모드의 투과이득보다 높아졌다. 이에 비해 양 거울면의 잔유반사율이 0.7%이고 거울면 grating 위상이 0인 그림 8(b)의 경우에는 2:1 구조에서도 단일모드동작을 보장할 수 없음을 볼 수 있다. 발진파장의 경우 완전 무반사 코팅된 경우에는 위상천이 지점에 따른 변화가 없으나 잔유반사율이 0.7%일 때에는 그림 8(b)에서 주모드의 발진파장이 장파장 쪽으로 변화하는 데에서 볼 수 있듯이 발진파장의 변화가 일어남을 알 수 있다.

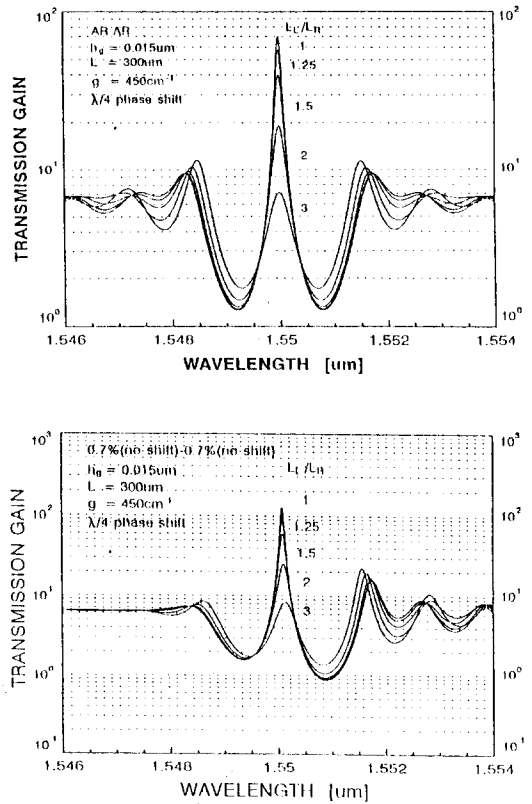


그림 8. 활성층의 이득이  $450\text{cm}^{-1}$ 일 때  $L_L:L_R$ 이 1:1, 1.25:1, 1.5:1, 2:1, 3:1이고 (a)양 거울면이 완전 무반사 코팅된 경우와 (b)잔유 반사율이 0.7%인 경우  $\lambda/4$  위상천이 DFB 레이저의 투과 이득 스펙트럼

Fig. 8. Transmission gain spectra (a) for perfectly antireflection coated and (b) for 0.7% low reflection coated lasers when the gain is  $450\text{cm}^{-1}$  and  $L_L:L_R$  is 1:1, 1.25:1, 1.5:1, 2:1, and 3:1.

그림 9는 위상천이 지점에 따른 문턱이득 차이를 보

인 것으로서 완전 무반사 코팅된 경우에는 2.5:1 이상에서  $50\text{cm}^{-1}$  이하로 떨어지는데 비해 잔유 반사율이 0.7%일 때는 거울면 grating 위상에 따른 분산 이외에 평균치 자체가 전체적으로 떨어져서 1.4:1 이하가 되어야  $50\text{cm}^{-1}$  이상의 문턱이득 차이를 유지하게 된다.

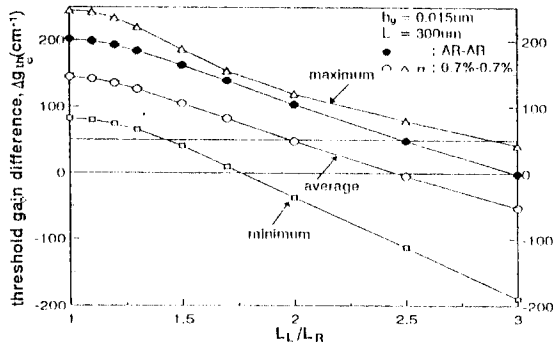


그림 9. 양 거울면의 잔유 반사율이 0.7%인 구조에서  $\lambda/4$  위상천이 위치에 따른 문턱이득 차이

Fig. 9. Threshold gain difference versus left-to-right cavity length ratio when the residual facet reflectivity is 0.7%.

완전 무반사 코팅된 경우에는 위상천이 지점이 한 쪽으로 치우쳐져 있을 수록 0 모드의 파워는 위상천이 지점과 거울면간의 길이가 짧은 쪽으로 더 많이 나오는데 비해  $\pm 1$  모드의 파워는 위상천이 지점과 거울면간의 길이가 긴 쪽으로 많이 나오는 것을 그림 10을 통해 알 수 있다. 즉 왼쪽과 오른쪽으로 나오는 출력 spectrum이 다르게 된다<sup>[5]</sup>. 0 모드는 위상 차이가 있는 grating 간의 보강간섭에 의해 발생되므로 그 중심점인  $\lambda/4$  위상천이 지점에 광파워가 집중되고 공진기와 위상천이 지점간의 길이가 짧을 수록 출력이 많이 나온다.  $\pm 1$  모드는 주로 위상천이가 없는 정현파 grating에 의한 보강간섭 때문에 만들어지므로 위상천이 지점에서는 광파워가 낮고 위상천이가 없는 정현파 grating이 길수록 광파워가 커지는 성질을 가진다. 잔유반사율이 0.7%인 경우에는 출력이 평균치를 중심으로 넓게 분포하므로 1.5:1 이하에서는 거울면 grating 위상에 따라 0모드의 광출력비가 1보다 큰 경우가 생긴다. 따라서 무반사 코팅을 매우 정밀하게 해주지 않은 경우에는 위상천이 지점의 이동만으로 높은 단일모드 동작 수율을 유지하면서 동시에 모든 거울면 grating 위상에서 한 쪽 방향으로만 광출력을 높이는

것은 어렵다.

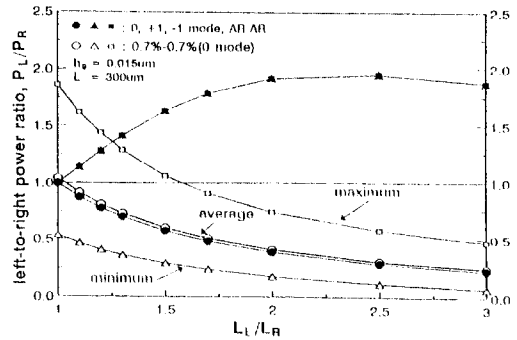


그림 10. 양 거울면의 잔유 반사율이 0.7%인 구조에서  $\lambda/4$  위상천이 위치에 따른 각 모드별 광파워 비

Fig. 10. Change in the left-to-right output power ratio with the ratio  $L_L/L_R$  when the residual facet reflectivity is 0.7%.

### V. 요약

grating의 높이가  $\kappa L$ 이 1.25로 되도록 조정된  $\lambda/4$  위상천이 DFB 레이저 다이오드에 대해서 위상천이 지점에서의 비이상적인 grating 구조, 위상천이 오차의 영향과  $\lambda/4$  위상천이의 위치에 따른 영향을 해석해 보았다. II장에서는 위상천이 지점에 나타나는 비이상적인 grating은 결국 위상천이 오차와 같은 효과를 나타내게 되고 그 영향은 매우 작으며 오히려 위상천이부의 광자밀도를 낮추는 효과가 있음을 보였다. 위상천이 오차가 발생했을 때에는 거울면 잔유반사의 영향과 맞물려 잔유반사율이 0.7%일 때에 위상천이 오차  $\delta$ 가  $\pm \lambda/8$  이상이 되면 단일 주파수 동작을 보장할 수 없게 되며 각 모드의 발진파장은  $\delta$ 가  $-\lambda/2$ 부터  $+\lambda/2$ 까지 증가할수록 장파장 쪽으로 옮겨가게 된다. 또 양 거울면의 잔유 반사율이 0.7%이고 spatial hole burning 효과 등에 의해  $\lambda/4$ 의 위상천이 오차가 발생했을 때의 단일 주파수 동작 수율은 약 90%이며 100% 단일모드 동작 수율을 얻기 위한 잔유 반사율 허용한계는 0.3%로 낮아진다.  $\lambda/4$  위상천이가 공진기의 정중앙에 있지 않고 한 쪽으로 치우쳐져 있으면 주모드의 문턱이득은 높아지고 결모드의 문턱이득은 낮아진다. 기본적으로 위상천이 지점과 거울면까지의 거리가 짧은 쪽으로 0 모드의 광파워는 많이 나오고 결모드는 적게 나오지만 거울면에서의 잔유반사가 있으

면 거울면의 grating 위상에 따라 달라진다. 위상천이 지점과 거울면까지의 길이가 길어질 수록 결모드들은 spatial hole burning이 일어날 때에도 이득을 지속적으로 크게 받아 발진할 가능성이 커진다. 따라서 발진 문턱이득 차이의 감소가 10% 이내이기 위해서는 위상천이 지점이 중앙으로부터 공진기 길이의 9%이내에 있어야 한다. 또 거울면의 잔유 반사율이 낮지 않으면 위상천이 지점의 이동만으로 단일모드 동작 수율과 출력비율을 동시에 높이는 것은 불가능하다.

#### 참 고 문 헌

- [1] M. Okai, "Spectral characteristics of distributed feedback semiconductor lasers and their improvements by corrugation-pitch-modulated structure," *J. Appl. Phys.*, 75(1), 1 Jan. 1994.
- [2] T. Makino, "Effective-index matrix analysis of distributed feedback semiconductor lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol.28, no.2, pp.434-440, Feb.1991.
- [3] T. Kijelberg, S. Nilsson, T. Klinga, B. Broberg, and R. Schatz, "Investigation of spectral characteristics of DFB lasers with different grating configurations made by electron-beam lithography," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 11, no. 9, pp.1405-1415, Sept. 1993
- [4] M. Okai, S. Tsuji, and N. Chinone, "Stability of the longitudinal mode in  $\lambda/4$ -shifted InGaAsP/InP DFB lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 25, no. 6, pp. 1314-1319, June 1989.
- [5] M. Usami, S. Akiba, and K. Utaka, "Asymmetric  $\lambda/4$ -shifted InGaAsP/InP DFB lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 23, no. 6, pp. 815-821, June 1987.
- [6] H. Soda et al, "Stability in single longitudinal mode operation in GaInAsP/InP phase-adjusted DFB lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 23, no. 6, pp. 804-814, June 1987.

---

#### 저 자 소 개

曹鍾涉(學生會員) 第 33卷 A編 第 1 號 參照

현재 아주대학교 대학원 석사과정

金相培(正會員) 第 33卷 A編 第 1 號 參照

현재 아주대학교 전기전자공학부 부교수