

論文96-33A-6-23

# 전달 매트릭스 방법을 이용한 DFB레이저의 단일주파수 동작 수율에 대한 연구

## (A Study on the Single Frequency Operation Yield of DFB Lasers Using a Transfer Matrix Method)

李在得\*, 金相培\*\*

(Jae Deuk Lee and Sang Bae Kim)

### 요 약

전달 매트릭스 방법 및 유효 굴절률법을 써서 균일 정현파 회절 격자  $1.55\mu\text{m}$  DFB레이저의 단일 주파수 동작 수율에 대해서 연구하였다. 문턱이득 차이와 공진기 내 광자 밀도의 불균일도를 동시에 고려하였을 때, LR(low reflection)-HR(high reflection)구조가 가장 수율이 높으며 이 때 HR면의 반사율이 높을수록 수율의 최고치가 증가하며 LR면의 반사율이 낮을수록 수율의 최고치가 나타나는 회절 격자 높이의 범위가 넓어지게 된다. LR-HR구조가 100Å 주위의 좁은 회절 격자 높이의 범위에서만 수율이 높은 반면에, LR-mirror구조는 100~300Å의 비교적 넓은 회절 격자 높이의 범위에 걸쳐서 50%이상의 수율을 얻을 수 있다. 또 LR-cleaved mirror구조에서는 LR면의 반사율을 0.5%이하로 하면 회절 격자 높이 150Å 부근에서 수율이 크게 감소하므로 LR면의 반사율을 1~5%사이로 맞추어 주어야 한다.

### Abstract

We have studied single-frequency yield of  $1.55\mu\text{m}$  DFB lasers with uniform sinusoidal grating using an effective index transfer matrix method considering both threshold gain difference and spatial hole burning effect. Optimum grating height and mirror reflectivities that maximize the single-frequency yield are found for a low-reflection(LR)/high reflection(HR) mirror structure and a LR/as-cleaved mirror structure for an assumed basic waveguide structure. LR/HR structure has a high yield of about 80% in a narrow range of grating height while LR/as-cleaved mirror structure has a low yield of about 50% in a relatively wide range of grating height. The effect of the low-reflection facet reflectivity is also studied.

### I. 서 론

Gbps급의 고속 변조하에서도 단일 모드를 유지하는 단일 주파수 레이저 다이오드로는 회절격자를 이용한 DFB레이저가 주로 사용되지만, 이 레이저는 제작의 어려움 외에도 많은 문제점들을 안고 있다. 가장 큰 문

제가 수율이 작다는 것인데 그 이유는 DFB구조 자체가 그 특성상 회절 격자높이와 양 쪽 거울면의 반사율, 그리고 거울면의 위치에 따라 동작 특성이 심하게 바뀌기 때문이다. 회절 격자의 주기가 매우 작으므로 거울면과 회절 격자 사이의 상대적 위치 변화에 따른 동작 특성의 변화는 불가피하다. 그렇지만 회절 격자높이와 거울면 반사율(power reflectivity)은 충분히 조절할 수 있는 양들이므로 단일 주파수 동작 수율을 최대한으로 하는 회절 격자 변수들과 거울면 반사율에 대한 조건을 찾아내는 일은 매우 중요하다. DFB레이저의 단일 주파수 동작을 결정하는 가장 중요한 요소는 주모

\* 學生會員, \*\* 正會員, 亞州大學校 電氣電子工學部  
(Division of Electrical & Electronics Eng., Ajou University)

接受日字: 1996年2月6日, 수정완료일: 1996年5月4日

드와 결모드의 문턱이득 차이와<sup>111,121,131,141,161,181</sup> 공진기 내의 광자 분포의 균일도인데<sup>151,171,191</sup> 이들은 회절 격자높이와 거울면 반사율의 함수이다. 이에 따라 거울면에서의 회절 격자 위상을 랜덤 변수로 하여 거울면 반사율과 회절 격자높이에 따른 문턱이득 차이, 또는 문턱이득 차이와 광자 분포의 불균일도를 동시에 고려한 수율의 계산이 이루어져 왔다.<sup>151,171,191</sup> 그러나 가장 널리 쓰이는 구조인 한 쪽 거울면의 반사율이 낮은 LR(low reflection)-cleaved mirror(간단히 mirror), LR-HR(high reflection)구조에서 HR면의 반사율과 회절 격자 높이분 동시에 고려한 단일주파수 동작 수율에 대한 체계적인 연구는 부족하여 정해진 반사율에 대한 최적의 회절 격자높이와 사용 가능한 범위를 알아내지 못했다. 더욱이, 중요한 공정요건인 LR면의 반사율이 수율에 미치는 영향에 대한 체계적인 연구도 이루어진 바 없다. 이러한 문제 인식 하에 1.55 $\mu\text{m}$ 대의 conventional DFB레이저의 소자 구조에 따른 단일 주파수 동작 특성을 전달 매트릭스 방법(transfer matrix method)<sup>1101</sup>과 유효 굴절율법을 이용하여 연구하였다. 먼저 II장에서는 문턱이득 차이와 공진기 내의 광자 분포가 회절 격자높이와 거울면 반사율에 따라 어떻게 변화하는가를 기술하였으며, III장에서는 단일 주파수 동작 수율을 최대도 하는 회절 격자높이와 거울면 반사율, 특히 LR면의 반사율이 미치는 영향을 기술하였다. 그리고 이상의 결과들을 종합하여 IV장에서 결론을 내렸다.

II. 회절 격자높이와 거울면 반사율에 따른 DFB레이저의 특성 변화

그림 1은 이 연구에 사용된 1.55 $\mu\text{m}$  conventional DFB레이저의 구조를 나타낸다.

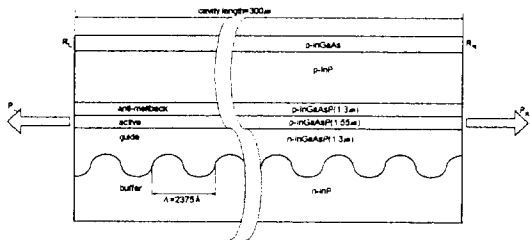


그림 1. 1.55 $\mu\text{m}$  균일 정현파 회절 격자 DFB레이저 다이오드의 구조  
Fig. 1. Structure of 1.55 $\mu\text{m}$  conventional uniform sinusoidal grating DFB laser.

가운데 1.55 $\mu\text{m}$  InGaAsP 활성층이 있고 그 위에 1.3 $\mu\text{m}$  InGaAsP anti-meltback층이 있으며 그 밑에는 1.3 $\mu\text{m}$  InGaAsP guide층이 존재한다. 회절 격자는 guide층과 buffer층 사이에 있다. 회절 격자의 주기  $\Lambda$ 는 Bragg 파장이 1.55 $\mu\text{m}$ 가 되도록 하기 위해 2375Å으로 하였으며 공진기 길이는 300 $\mu\text{m}$ 로 하였다. 그 외에 DFB레이저 구조 상수와 프로그램에서 사용된 변수들은 표 1에 정리하였다.

표 1. DFB레이저 다이오드의 구조 상수와 프로그램 변수값

Table 1. Material and structure parameter of the DFB laser used in the calculation.

DFB레이저 해석에 사용된 특성 변수	값
grating period	2375 [Å]
cavity length	300 [ $\mu\text{m}$ ]
absorption loss in active layer	$1.4 \times 10^{-2}$ [ $\text{cm}^{-1}$ ]
absorption loss in guide layer	$2.0 \times 10^{-3}$ [ $\text{cm}^{-1}$ ]
absorption loss in buffer layer	$1.0 \times 10^{-1}$ [ $\text{cm}^{-1}$ ]
absorption loss in p-InP layer	$1.0 \times 10^{-3}$ [ $\text{cm}^{-3}$ ]
absorption loss in blocking layer	$5.5 \times 10^{-1}$ [ $\text{cm}^{-1}$ ]
active layer width	1.5 [ $\mu\text{m}$ ]
thickness of active layer	$1.0 \times 10^{-1}$ [ $\mu\text{m}$ ]
thickness of anti meltback layer	$1.0 \times 10^{-1}$ [ $\mu\text{m}$ ]
average thickness of guide layer	$1.0 \times 10^{-1}$ [ $\mu\text{m}$ ]

양 쪽 거울면이 무반사 코팅 된 경우에는 Bragg파장(본 논문에서는 1.55 $\mu\text{m}$ )을 중심으로 좌우 두 모드가 동시에 발전하게 되며 이 때에는 거울면에서의 회절 격자 위상 변화가 DFB레이저의 동작에 영향을 주지 않는다. 그러나, 이 때에는 문턱 전류가 너무 크고 두 모드 사이의 문턱이득 차이가 너무 작기 때문에 단일주파수 동작이 매우 어렵다. 문턱이득 차이를 증가시키기 위해서는 비대칭 요소를 첨가해야 하는데 그 방법으로 거울면 처리를 하는 방법이 주로 사용된다. 그러나, 이 경우에는 DFB레이저의 특성이 거울면에서의 회절 격자 위상에 따라서 매우 심하게 바뀌게 되며, 또한 양 쪽 거울의 반사율(power reflectivity)과 회절 격자높이에 따라라도 심하게 변화한다. 회절 격자의 주기가 워낙 작으므로 거울면의 위치에 따른 특성 변화는 어찌할 수 없지만, 회절 격자높이와 거울면 반사율은 충분히 조절할 수 있는 양들이므로 이들의 변화에 따른 문턱이득 차이와 공진기 내 광자 분포의 변화를 자세히 조사해 보는 것은 단일 주파수 동작 수율을 최대도 하는 회절 격자 변수들과 거울면 조건들을 추출

하는 데에 기초가 된다. 이 연구에서는 회절 격자 한 주기를 12등분하여 왼쪽에서 12가지, 오른쪽에서 12가지로 거울면의 위치에 대한 총 144가지의 경우에 대해 모두 simulation해 본 후에 결과들을 통계 처리하였다. 단, 정밀한 계산이 필요하지 않다고 판단 된 부분에서는 왼쪽과 오른쪽에 각각 8가지로 총 64의 경우의 수만을 가지고 계산하기도 하였다.

1. 문턱이득 차이의 회절 격자높이와 거울면 반사율에 따른 변화

먼저 단일 주파수 동작 수율을 결정하는 가장 중요한 요소인 주모드의 문턱이득과 결모드의 문턱이득 사이의 차이가 회절 격자높이와 거울면 반사율에 따라서 변화하는 모습을 조사해 보았다. III장에서 단일 주파수 동작 수율을 계산할 때에 단일 주파수 동작의 기준으로 문턱이득 차이가  $40\text{cm}^{-1}$  이상이어야 한다는 조건을 사용하였다.<sup>19)</sup> 여기서 이득은 전체의 재공에 비례하는 광강도에 대한 물질 이득을 말하므로 전체에 대한 주모드와 side모드의 발진 문턱 이득 차이  $\Delta\alpha$ 와 공진기 길이 L의 곱으로 주어지는 정규화된 문턱이득 차이  $\Delta\alpha L$ 로 환산하면  $40\text{cm}^{-1}$ 은  $\Delta\alpha L \approx 0.14$ 에 해당한다.

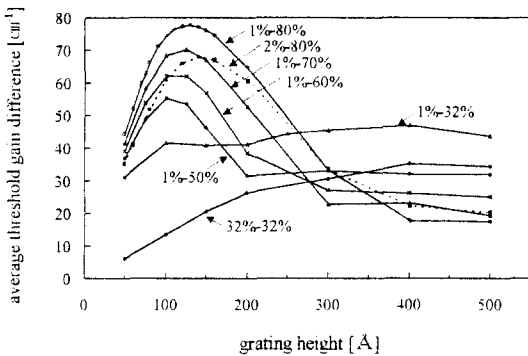
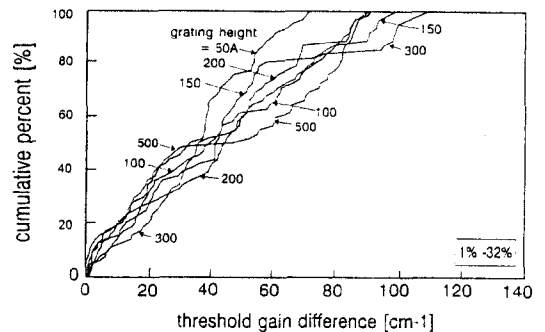


그림 2. 문턱이득 차이 평균값의 회절 격자높이와 거울면 반사율에 따른 변화

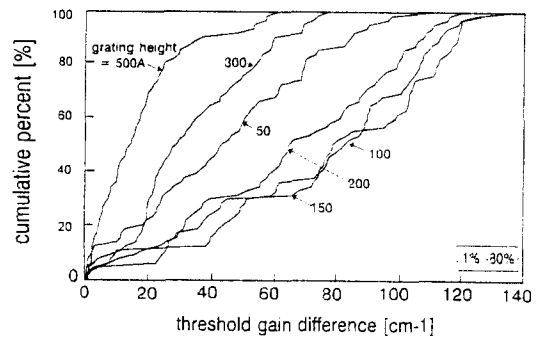
Fig. 2. Dependence of average threshold gain difference on grating height and end facet reflectivity.

그림 2를 보면 알 수 있는 바와 같이 단면이 cleaving된 mirror-mirror구조에서는 문턱이득 차이의 평균값이 상당히 낮음을 알 수 있고, LR(1%)-mirror(32%)구조에서는 모든 회절 격자높이에 걸쳐서 문턱이득 차이의 평균값이 거의 일정한 것을 알 수 있다. 여기서 mirror구조란 레이저 다이오드를 아무 코팅 없이 cleaving한 경우를 의미하며 이 때 반사율은

32%정도가 된다. LR-HR구조에서는 100~150Å의 범위에서 문턱이득 차이의 평균값이 매우 크며 그 이상으로 회절 격자가 높아지면 문턱이득 차이는 감소하게 된다. 이와 같은 현상이 일어나는 이유는 회절 격자가 높아질수록 공진기 내부에서 빛의 반사가 회절 격자에 의해서 일어나기 때문에 DFB레이저에서 비대칭요소를 공급해 주면 거울의 영향이 감소하게 되기 때문이다. 또 HR쪽의 반사율이 커질수록 문턱이득 차이의 평균값이 가장 크게 되는 회절 격자 높이가 점점 커진다. 그 이유는 고반사 코팅면의 반사율이 커질수록 비대칭요소가 증가하므로 더 높은 회절 격자에서도 문턱이득 차이가 크게 유지되기 때문이다.



(a)



(b)

그림 3. a) LR(1%) mirror(32%)구조와 b) LR(1%) HR(80%)구조에서 회절 격자높이에 따른 문턱이득 차이의 누적 분포도

Fig. 3. Cumulative percent of threshold gain difference in a) LR(1%) - mirror(32%) and b) LR(1%) - HR(80%) combination depending on the grating height.

그림 2에 의하면 DFB레이저를 만들 때에 mirror-mirror구조는 문턱이득 차이가 작기 때문에 쓰지 않는 것이 좋고 LR-mirror구조는 회절 격자 높이의 조절

을 정확하게 해결 필요가 없다는 장점은 있지만 전반적으로 문턱이득 차이는 작게 되며, LR-HR구조는 문턱 이득 차이는 큰 반면 회절 격자 높이를 정밀하게 80~140Å 정도로 해 주어야 함을 알 수 있다. 그림 3 a)~b)는 LR(1%)-mirror구조와 LR-HR구조에서 HR면의 반사율이 60%, 80%인 경우에 회절 격자높이에 따른 문턱이득 차이의 무게 분포도이다. 문턱이득 차이가 어느 정도 이상이 되어야만 단일 주파수 동작이 가능하므로 무게 분포도 상에서 오른쪽에 위치할수록 단일 주파수 동작 수율이 높게 된다. 그림 3 a), b)로부터 문턱이득 차이만을 고려하면 LR(1%)-HR(80%)구조에서 회절 격자 높이 100Å 정도일 때가 가장 좋을 수 있다.

2. 광자 밀도 균일도의 회절 격자높이와 거울면 반사율에 따른 변화

DFB레이저의 공진기 전체에 걸친 광자 밀도의 균일도는 문턱이득 차이와 함께 단일 주파수 동작 수율을 결정하는 중요한 요소이다. 그 이유는 광자가 많이 모인 곳에서는 유도 방출이 매우 강하게 일어나게 되고 따라서 inversion carrier의 수가 줄어들어 그 지점에서의 유효 이득이 줄어들고 유효 굴절율이 커지면서 회절 격자의 유효 주기가 변하며, 이 변화된 상태가 발진 문턱 이득 차이를 감소시키기 때문이다. 이와 같은 spatial burning 현상은 문턱이득 차이의 감소, 레이저 파장 변화, L-I특성의 비선형성 등의 원인이 되므로 특히 고출력 응용에서는 광자 밀도의 균일도가 매우 중요한 요소가 된다.<sup>15), 71), 19)</sup>

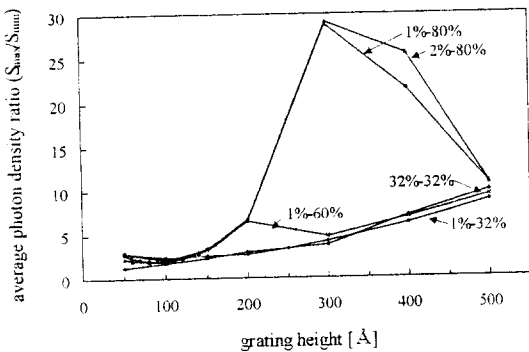
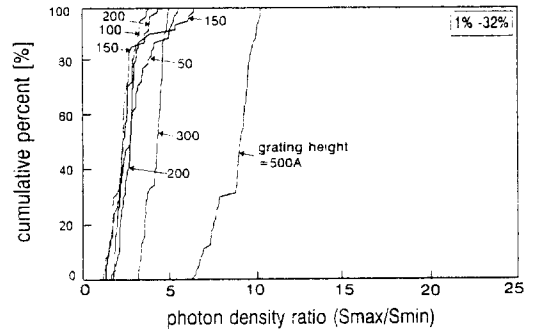
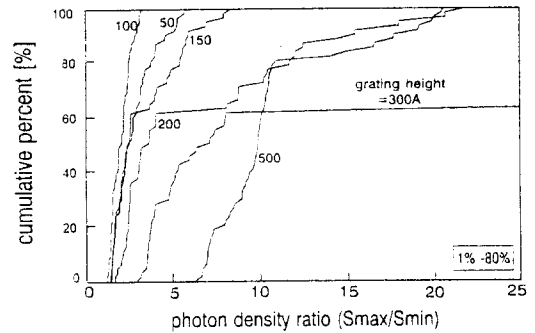


그림 4. 광자밀도비(Smax/Smin) 평균값의 회절 격자 높이와 거울면 반사율에 따른 변화  
Fig. 4. Dependence of average photon density ratio(Smax/Smin) on grating height and end facet reflectivity.



(a)



(b)

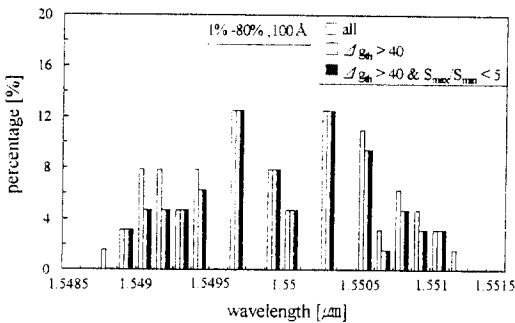
그림 5. a) LR(1%)-mirror(32%)구조와 b) LR(1%)-HR(80%)구조에서 회절 격자높이에 따른 광자 밀도비(Smax/Smin)의 무게 분포도

Fig. 5. Cumulative percent of photon density ratio(Smax/Smin) in a) LR(1%)-mirror(32%) and b) LR(1%)-HR(80%) combination depending on the grating height.

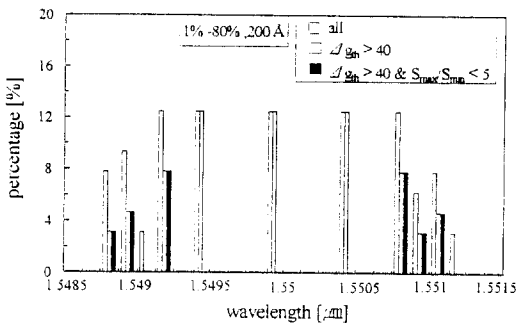
그림 4를 보면 mirror구조와 LR-mirror구조에서는 회절 격자가 높아질수록 광자 밀도비(공진기 안에서 광자 밀도의 최대값과 최소값의 비율, Smax/Smin)가 커진다는 것과 LR-HR구조에서는 HR쪽의 반사율이 커질수록 300Å 정도에서 광자 밀도비가 매우 커진다는 것을 알 수 있다. 고출력에서의 단일 주파수 동작을 위해서는 광자 밀도비가 작아야 하는데, LR-HR구조는 문턱이득 차이가 가장 컸던 회절 격자 높이 80~140Å의 범위에서 광자 밀도비가 가장 작기 때문에 이 부분에서 LR-HR구조 DFB레이저의 단일 주파수 동작 수율은 상당히 커질 것으로 예상된다. 여기서 한가지 주목해야 될 사실은 LR-HR구조에서는 회절 격자 높이가 150Å 이상이 되면 광자 밀도비는 매우 커지게 되고 문턱이득 차이는 감소하게 되므로 단일 주파수 동작 수율이 급격히 떨어지게 된다는

것이다. 따라서 LR-HR구조의 DFB레이저를 만들 때에는 회절 격자 높이를 80~140Å로 정밀하게 유지시키는 것이 매우 중요하다.

그림 5 a), b)는 LR-mirror구조와 LR-HR구조에서 각 회절 격자 높이에서의 광자 밀도비에 대한 누계 분포도이다. 광자 밀도비는 작을수록 좋기 때문에 누계 분포도 상에서 왼쪽에 위치할수록 이상적이다. 1%-80%의 경우에 300Å 근처에서는 광자 밀도의 균일도가 매우 나쁘지만, 100Å 정도에서는 1%-60%나 1%-32%와 비교해서 별 차이가 없음을 알 수 있다. 이것은 LR(1%)-HR(80%)구조의 단점으로 예상되었던 불균일한 광자 밀도 문제가 회절 격자가 낮을 때에는 심각하지 않다는 것을 보여 준다.



(a)



(b)

그림 6. LR(1%)-HR(80%)구조에서 a) 회절 격자 높이가 100Å인 경우와 b) 200Å인 경우의 레이저 파장 분포. 문턱이득 차이와 광자 밀도의 균일도에 대한 조건을 만족시키는 경우들만의 레이저 파장에 대한 분포도 함께 나타나 있다.

Fig. 6. Distribution of lasing wavelength of main modes in LR(1%)-HR(80%) combination at the grating height of a) 100Å and b) 200Å. Distribution of the main modes that satisfy the single frequency operation conditions is also included.

그림 6 a), b)는 LR(1%)-HR(80%)구조에서 회절 격자 높이가 100Å과 200Å인 경우에 주모드 파장의 분포인데 문턱이득 차이가 40cm<sup>-1</sup>이하인 경우는 일단 단일 주파수 동작을 하지 못할 것으로 정하여 40cm<sup>-1</sup> 이상인 경우들만에 대한 분포를 함께 그렸으며, 또 광자 밀도비가 5이상인 경우들까지도 제거한 후 남은 경우들만에 대한 분포도 추가하였다. 그 이유는 뒤에서 단일 주파수 동작 수율을 계산할 때에 문턱이득 차이는 40cm<sup>-1</sup>이상이고 광자 밀도비는 5이하인 경우에 단일 주파수 동작이 가능하다고 알려져 있기 때문이다.<sup>19)</sup>

LR-HR구조에서는 HR면의 회절 격자 위상이 A/4인 경우에는 HR면에서 Bragg파장을 중심으로 보강 간섭이 일어나서 주모드가 Bragg파장에서 발진하게 되고, A/8와 3A/8인 경우에도 Bragg 파장은 아니더라도 Bragg 파장 가까이에서 주모드가 발진하게 된다. 이처럼 Bragg 파장 부근에서 발진하는 주모드를 gap 모드라고 하는데<sup>12)</sup> 이 gap모드들은 문턱이득 차이는 매우 크지만 HR면에 광자가 많이 모이는 현상이 두드러지게 나타난다. 따라서, Bragg파장 근처에서 주모드가 발진하는 경우에는 불균일한 광자 밀도 때문에 단일 주파수 동작이 어려워지게 된다. 그림 6 a)에 나타나 있듯이 회절 격자 높이가 100Å일 때는 gap모드들이 많이 있지만, 이 때에는 광자 밀도비가 전체적으로 작아 gap모드들이 고출력에서도 주모드로 남아 있을 수 있어 LR(1%) HR(80%), 100Å구조에서는 광자 밀도의 불균일에 의한 영향은 거의 받지 않고 문턱이득 차이가 낮은 경우가 거울면의 위치에 따라 조금 생기는 것에 의해서만 수율이 감소하게 된다. 또 Bragg 파장 근처의 gap모드들은 문턱이득 차이가 크다는 것을 관찰할 수 있다. 그러나 그림 6 b)를 보면 회절 격자가 200Å으로 높아짐에 따라 광자 밀도의 불균일에 의한 수율의 감소가 심각함을 알 수 있다. 특히 주모드가 gap모드인 경우는 문턱이득 차이는 크지만, 광자 밀도비가 5이하인 경우가 거의 없게 된다.

### III. 단일 주파수 동작 수율

DFB레이저의 단일 주파수 동작 수율은 문턱이득 차이와 광자 밀도 균일도의 두 가지 요소에 의해 주로 결정된다. 이 장에서는 이 두 가지 요소를 기준으로 단일 주파수 동작 수율을 DFB레이저 구조 변화에 따라 계산해 보았다. 이를 기초로 수율이 최대가 되는 회절

격자높이와 거울면 반사율에 대해 살펴보았다.

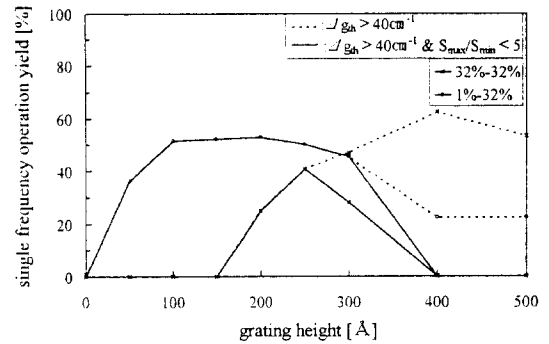
### 1. 회절 격자높이와 거울면 반사율에 따른 단일 주파수 동작 수율의 변화

DFB레이저의 단일 주파수 동작 수율을 계산하는 데는 두 가지의 방법이 있다. 첫째는, 문턱이득 차이만을 고려하는 것으로, 문턱이득 차이가 어느 이상이 되면 일단 단일 주파수 동작이 가능하다고 보는 것이다. 그러나, 이와 같이하여 계산한 수율은 저출력의 경우에만 옳다고 할 수 있는데, 그 이유는 고출력이 되면 불균일한 광자 밀도가 단일 주파수 동작을 방해하기 때문이다. 따라서, 고출력의 경우에 단일 모드 동작을 하기 위해서는 문턱이득 차이가  $40\text{cm}^{-1}$  이상이 되어야 함은 물론이고, 광자 밀도비가 5이하가 되어야만 한다.<sup>17</sup>

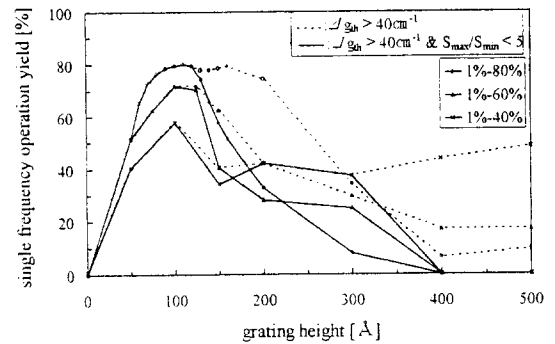
그림 7 a)는 LR(1%)·mirror(32%), mirror(32%)·mirror(32%)구조에서 회절 격자높이에 따른 단일 주파수 동작 수율을 보여 주고 있다. LR(1%)·mirror(32%)구조는 회절 격자 높이가 80~270Å의 넓은 범위에서 거의 50%정도의 일정한 수율을 보이는데 이것은 LR mirror구조의 DFB레이저를 제조할 때에는 회절 격자 높이의 조절을 매우 정교하게 할 필요가 없다는 것을 시사한다. 이러한 사실은 오른쪽 면을 아무 코팅 없이 cleaving하기만 하면 된다는 점과 함께 제조상의 관점에서 LR·mirror구조가 가지고 있는 큰 장점이라 할 수 있다. Mirror·mirror구조는 문턱이득 차이만을 고려했을 때는 400Å 정도의 높은 회절 격자에서 수율이 높지만 광자 밀도의 불균일도까지 고려했을 때는 400Å이상의 회절 격자 높이에서는 수율이 0이 되기 때문에 수율이 매우 작아지게 된다.

그림 7 b)는 LR면의 반사율을 1%로 정하고 HR면의 반사율을 변화시켰을 때의 단일 주파수 동작 수율을 보여 주고 있다. LR HR구조는 회절 격자 높이가 80~150Å에서 수율이 가장 크고 회절 격자가 그 이상으로 높아지면 수율이 급격하게 감소하므로 회절 격자를 100Å부근의 적당한 범위에서 잘 조절하는 것이 매우 중요하게 된다. 또, HR면의 반사율이 높을수록 수율의 최대값이 커지게 되므로 LR·HR구조에서는 고반사 코팅을 잘 할수록 높은 수율을 얻을 수 있다. 그림 7 a)와 b)를 비교해 보면 고반사 코팅을 잘 할 수 있고 회절 격자 높이의 조절을 정확하게 할 수 있는 경우에는 LR·HR구조에서 높은 수율을 얻을 수 있지

만, 고반사 코팅과 회절 격자 높이의 조절을 정교하게 할 수 없는 경우에는 회절 격자 높이의 넓은 범위에 걸쳐 50%정도의 수율을 보이는 LR·mirror구조가 더 유리하다는 것을 알 수 있다.



(a)



(b)

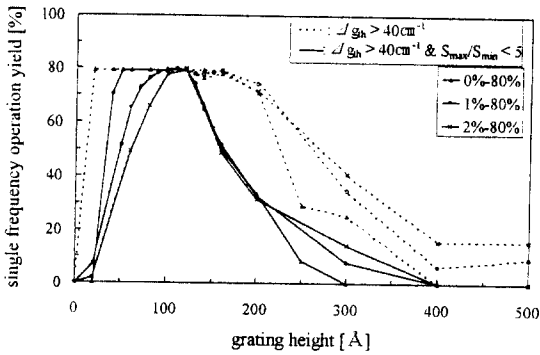
그림 7. a) LR(1%) mirror(32%), mirror(32%)·mirror(32%)구조에서 회절 격자높이에 따른 단일 주파수 동작 수율 b) LR(1%)·HR구조의 HR면 반사율과 회절 격자높이에 따른 단일 주파수 동작 수율

Fig. 7. a) Dependence of single frequency operation yield on the grating height in LR(1%)·mirror(32%), and mirror(32%)·mirror(32%) structures. b) Dependence of single frequency operation yield on the reflectivity of HR facet and grating height in LR(1%)·HR structure.

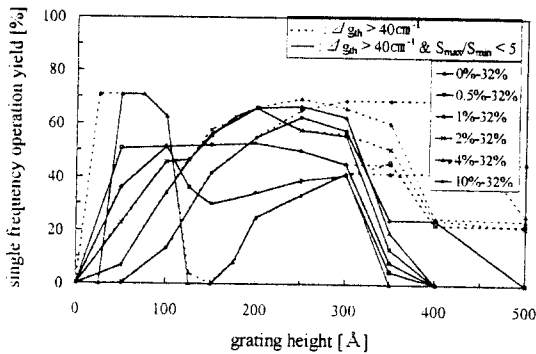
### 2. LR면 반사율이 단일 주파수 동작 수율에 미치는 영향

그림 7 b)에서 관찰할 수 있는 바와 같이 LR·HR 구조에서는 HR면의 반사율이 클수록 단일 주파수 동작 수율이 높아지게 된다. 따라서, 최적의 HR면 반사율을 80%로 할 때 LR면의 반사율이 어떤 영향을 미칠지가 중요한 관심사이다. 그림 8 a)는 HR면의 반사

율은 80%이고 LR면의 반사율이 0%, 1%, 2%인 경우에 회절 격자높이에 따른 단일 주파수 동작 수율을 그린 것으로 LR면의 반사율이 작을수록 수율의 최고치가 유지되는 회절 격자 높이의 범위가 넓어진다는 것을 알 수 있다. 회절 격자 높이를 정확히 조절하기 힘들에 비추어 무반사 코팅을 잘 하는 것이 안정된 수율을 얻는 데에 있어 매우 중요함을 보여 준다. 특히 0%-80%일 때에는 20Å의 회절 격자 높이에서도 충분한 문턱이득 차이를 유지하나, 광자 밀도의 불균일성 때문에 수율이 낮아지게 된다.



(a)



(b)

그림 8. a) LR-HR(80%)구조와 b) LR-mirror(32%) 구조에서 LR면 반사율과 회절 격자높이에 따른 단일 주파수 동작 수율

Fig. 8. Dependence of single frequency operation yield on the reflectivity of the LR facet and grating height in a) LR-HR(80%) and b) LR-mirror(32%) structures.

그림 8 b)는 LR-mirror구조에서 LR면의 반사율이 0%, 0.5%, 1%, 2%, 4%, 10%일 때 단일 주파수 동작 수율을 그린 것이다. LR-mirror구조에서는 회절 격자 높이가 300Å이하에서는 광자 밀도의 불균일성

의한 수율의 감소는 거의 없다는 것과 LR면의 반사율이 1~5%의 경우에 넓은 회절 격자 높이의 범위에 걸쳐 50%이상의 수율을 얻게 된다는 것을 관찰할 수 있다. 한 가지 주목할 점은 LR면의 반사율이 0인 경우에는 회절 격자 높이가 150Å에서 문턱이득 차이가 매우 작아져서 수율이 0이 된다는 것이다.<sup>[4]</sup> LR면의 반사율이 0.5%인 경우에도 회절 격자 높이가 150Å에서는 수율이 감소한다는 것을 관찰할 수 있는데 이것은 무반사 코팅을 너무 잘하면 오히려 수율이 감소하게 된다는 것을 시사한다. 이와 같은 현상이 일어나는 이유는 LR면의 반사율이 매우 작을 때에는 회절 격자 높이가 150Å을 중심으로 회절 격자가 낮은 경우와 높은 경우의 주모드 파장이 서로 교체되는 현상이 일어나기 때문이다. 즉, 회절 격자가 150Å보다 낮은 경우와 높은 경우에 HR면의 회절 격자 위상이 같은 경우들끼리 비교해 보면 Bragg파장을 중심으로 주모드의 위치가 대부분의 경우 반대가 된다. 따라서 그와 같이 주모드의 위치 변화가 일어나는 지점인 150Å에서는 주모드와 결모드의 문턱이득이 거의 비슷하게 되어 HR면 위상에 관계없이 문턱이득 차이가 작아지게 된다. 또 LR면을 완전하게 무반사 처리할 때에는 회절 격자 높이를 50~100Å으로 조절해 주면 높은 수율을 얻을 수 있다.<sup>[5]</sup> 한편 LR면의 반사율을 높이면 사용 가능한 회절 격자 높이의 범위는 줄어들지만 수율은 약간 증가한다.

#### IV. 결론

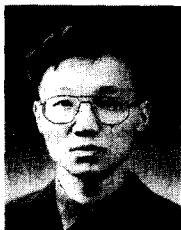
도파관 및 물질 분산을 모두 고려한 전달 매트릭스 방법 및 유효 굴절률법을 써서 균일 정현파 회절 격자의 1.55μm DFB레이저에 대한 단일 주파수 동작 수율을 조사하였다. DFB레이저의 특성은 회절 격자높이와 양 쪽 거울면 반사율에 따라서 매우 심하게 바뀌므로 단일 주파수 동작 수율을 최대를 하는 회절 격자높이와 거울면 반사율에 대한 조건이 존재하게 되는데, 조사 결과 LR-HR구조에서 수율이 가장 높으며 이 때 HR면의 반사율이 높을수록 수율의 최대값이 증가하고 무반사 코팅을 잘할수록 높은 수율이 나타나는 회절 격자 높이의 범위가 넓어지게 된다. LR-HR구조의 가장 큰 단점은 수율이 높은 값을 유지하는 회절 격자 높이의 범위가 80~125Å으로 좁다는 것이다. LR-mirror구조를 쓰면 100~300Å의 비교적 넓은 회

절 격자 높이 범위에 걸쳐서 50%이상의 수율을 얻을 수 있는데 한 가지 주의할 사실은 LR면의 반사율을 너무 낮게 하면 회절 격자 높이가 150Å 부근에서는 수율이 급격히 감소하므로 LR면 반사율을 1~5%사이로 유지해 주어야 한다는 것이다. 이 계산은 도파관의 특성만을 고려한 것으로 활성층 이득 스펙트럼의 영향을 추가할 필요가 있으며, 회절 격자 높이를 결합 계수로 환산해 줌으로써 도파관 구조에 관계없는 일반적인 결론을 얻을 수 있다.

### 참 고 문 헌

- [1] J. Buss, "Mode selectivity in DFB lasers with cleaved facets," *Electronics Lett.*, vol.21, no.5, pp.179~180, Feb. 1985.
- [2] C. H. Henry, "Performance of distributed feedback lasers designed to favor the energy gap mode," *IEEE J. Quantum Electronics.*, vol.21, no.12, pp.1913~1918, Dec. 1985.
- [3] K. Kobayashi, and I. Mito, "High light output-power single-longitudinal-mode semiconductor laser diodes," *IEEE J. Lightwave Technology*, vol.3, no.6, pp.1202~1210, Dec. 1985.
- [4] J. Buss, "Dynamic single-mode operation of DFB lasers with phase-shifted gratings and reflecting mirrors," *IEE Proc. J.*, vol.133, no.2, pp.163~164, April 1986.
- [5] H. Soda, H. Ishikawa, and H. Imai, "Design of DFB lasers for high-power single-mode operation," *Electronics Lett.*, vol.22, no.20, pp.1047~1049, Sept. 1986.
- [6] L. J. P. Ketelsen, I. Hoshino, D. A. Ackerman, "Experimental and theoretical evaluation of the CW suppression of TE side modes in conventional 1.55 $\mu$ m InP-InGaAsP distributed feedback lasers," *IEEE J. Quantum Electronics.*, vol.27, no.4, pp.965~975, April 1991.
- [7] L. J. P. Ketelsen, D. A. Ackerman, "The role of axially nonuniform carrier density in altering the TE-TE gain margin in InGaAsP-InP DFB lasers," *IEEE J. Quantum Electronics.*, vol.27, no.4, pp. 957~964, April 1991.
- [8] G. P. Agrawal and N. K. Dutta, *Semiconductor Lasers (2nd ed.)*, Van Nostrand Reinhold, pp. 350, 1993, New York.
- [9] 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 Electronics.*, vol.27, no.6, pp.1714~1723, June 1991.
- [10] T. Makino, "Effective-index matrix analysis of distributed feedback semiconductor lasers." *IEEE J. Quantum Electronics.*, vol.28, no.2, pp.434~440, Feb.1991.

### 저 자 소 개



李在得(學生會員)

1974년 2월 15일생. 1996년 2월 아주대학교 전자공학과 졸업(공학사). 현재 광주 과학기술원 석사과정 1학기 재학 중. 주관심 분야는 광전소자, 광집적 회로 등임.

金相培(正會員) 第31卷第6號 參照

현재 아주대학교 전기전자공학부 부교수