

# 회절격자 반주기의 상관관계가 있는 랜덤 변이가 $\lambda/4$ 위상천이 DFB 레이저 특성에 미치는 영향

## (Effects of the Correlated Random Fluctuation in Grating Half-period on the Characteristics of Quarter Wavelength Shifted DFB Lasers)

韓在雄\*, 金相培\*\*

(Jae Woong Han and Sang Bae Kim)

### 요 약

회절격자의 인접한 반주기 길이 사이에 음의 상관관계가 있는 회절격자 반주기의 랜덤 변이가 QWS-DFB 레이저의 특성에 미치는 영향을 유효 굴절률 전달 매트릭스 방법을 이용하여 해석하였다. 상관계수가 0에서 -1로 가까이 감에 따라 랜덤 변이에 의한 회절격자 주기의 오차가 감소하면서 단일모드 안정성과 파장 정확도의 저하가 덜 심각해진다. 이는 랜덤 변이의 크기가 같다면 상관관계가 없는 전자빔 lithography 법으로 회절격자를 만들기보다는 optical lithography법으로 만드는 것이 회절격자 주기 랜덤 변이의 영향을 줄이는 데에 유리함을 의미한다. 그리고 전자빔 lithography를 이용하여 DFB 레이저를 만들 때에 랜덤 변이의 영향을 줄이려면 분해능을 높이거나, 인접 반주기 길이의 랜덤 변이에 음의 상관관계를 주어야 한다.

### Abstract

Effects of the correlated random fluctuation in each grating half-period have been studied by an effective index transfer matrix method in quarter wavelength shifted DFB lasers. As the correlation coefficient changes from 0 to -1, single mode stability and wavelength accuracy are less degraded by the reduced error in the grating period. This fact shows that holographic grating fabrication is better than electron-beam lithography in discrete device fabrication provided that the magnitude of the random fluctuation is the same.

### I. 서 론

광통신 시스템에서 고속 대용량의 정보교환이 요구되면서 파장 다중화 방식(Wavelength Division Multiplexing)이 쓰이기 시작하였다. 정보 처리 요구의 증가에 따라 채널 수가 증가하고 채널 간격이 좁아지면서 광원의 파장 정확도에 대한 요구조건은 점점 엄

격해지고 있다. 이에 따라 고출력 동작과 안정된 단일 파장 동작이 가능하여 파장 다중화 방식의 광원으로 사용되는 DFB(Distributed Feedback) 레이저의 파장 정확도에 영향을 주는 요소에 대한 연구가 절실히 요구되고 있다. DFB 레이저는 회절격자의 파장 선택 능력을 이용하므로, 도파로의 물질/구조와 회절격자 구조 변수에 의해 발진 파장이 결정된다.<sup>[1]</sup> 이렇게 DFB 레이저의 파장 정확도에 영향을 미치는 요소 가운데에서 가장 조절하기 어려운 것은 길이가  $0.1\mu\text{m}$  정도인 회절격자 반주기의 랜덤 변이이다.

여러 가지 DFB 레이저 가운데에서도 QWS(Quarter wavelength shifted)-DFB 레이저는 Bragg 파장에서

\* 正會員, \*\* 學生會員, 亞洲大學校 電子工學部  
(School of Electronics Engineering, Ajou University)  
接受日字:2000年3月21日, 수정완료일:2000年7月6日

발전하여<sup>[2]</sup> 파장 정확도와 단일 모드 안정성이 뛰어나 파장 다중화 방식 시스템의 광원으로 매우 적합하다. QWS-DFB 레이저의 회절격자를 만드는 방법에는 여러 가지가 있지만 전자빔 lithography법과 optical lithography 법이<sup>[3]</sup> 가장 많이 쓰인다. 전자빔 lithography법을 사용하면 회절격자 반주기 패턴을 하나씩 순서대로 만들므로 회절격자 반주기 길이 사이의 상관관계가 없는 반면 optical lithography법은 한꺼번에 패턴을 만드는 방법이므로 회절격자 반주기 분할 사이에 음의 상관관계가 생기게 된다. 따라서 회절격자 반주기 사이에 상관관계가 있을 때 회절격자 반주기 길이의 랜덤 변이가 QWS-DFB 레이저 특성에 어떤 영향을 미치는지 알아보는 것은 파장 다중화 방식 시스템 광원의 성능 요건이 엄격해지고 있음에 비추어 볼 때 매우 의미 있는 일이라 할 수 있다. 이와 같은 중요성에도 불구하고, 이 분야의 연구는 많이 이루어지지 않아 상관관계가 없는 랜덤 변이의 영향에 대한 기초적인 연구가 이루어졌을 뿐이다.<sup>[4]</sup> 이 논문의 목표는 회절격자 반주기 길이의 음의 상관관계가 있는 랜덤 변이가 QWS-DFB 레이저의 단일모드 안정성과 파장 정확도에 미치는 영향을 알아보는 것이다. 먼저 II장에서는 유효 굴절률 전달 매트릭스 방법을<sup>[5]</sup> 사용함에 있어 각각의 회절격자 반주기의 상관관계가 있는 랜덤 변이를 어떻게 모델링하였는지에 대하여 설명하였다. III장에서는 상관관계가 있는 회절격자 주기의 랜덤 변이가 양 거울면이 완전 무반사 처리된 QWS-DFB 레이저 특성에 미치는 영향을 알아보았다. 마지막으로 IV장에서는 II장과 III장에서 기술한 내용을 바탕으로 결론을 맺는다. 이 연구의 의미는 회절격자 제작 공정 요건을 산출하고 랜덤 변이의 영향을 최소화하는 방안을 찾는 데에 있어 정량적인 기초를 제공한다는 데에 있다.

## II. 해석 방법

실제로 제작되는 사각과 형태의 회절격자에서 나타날 수 있는 구조적인 변이에는 회절격자 높이와 회절격자 반주기의 길이 변이가 있을 수 있다. embedded 회절격자를 쓸 때에는 회절격자 높이가 에피택시로 기른 층의 두께로 주어지기 때문에 수 Å 범위에서 제어가 가능하고 전체 높이가 2000 Å 정도여서 두께 변이

에 의한 영향은 작다. 그러므로 이 연구에서는 상대적으로 영향력이 큰 회절격자 반주기 길이의 랜덤 변이를 고려하기로 한다. 이상적인 회절격자 주기  $\Lambda_0$  는

$$\Lambda_0 = \frac{\lambda_B}{4} \left( \frac{1}{n_L} + \frac{1}{n_H} \right) \quad (1)$$

로 나타낼 수 있으며,  $\lambda_B$ 는 Bragg 파장,  $n_L$ 은 사각과 회절격자에서 낮은 유효 굴절률,  $n_H$ 는 높은 유효 굴절률을 각각 나타낸다. 회절격자 길이의 변이 사이에 상관관계를 주기 위해서는 먼저 길이 변이를 나타내는 랜덤 변수 사이에 상관관계를 주어야 한다. 낮은 굴절률 반주기 길이 변이를 나타내는 랜덤 변수  $v_{LK}$ 와 높은 굴절률 쪽의 랜덤 변수  $v_{HK}$  사이의 관계는 아래와 같다.

$$v_{LK} = \gamma' v_K' + \gamma v_{HK} \quad (2)$$

여기에서  $v_{HK}$ 와  $v_K'$ 는 평균이 0이고 표준편차가 1인 독립적으로 생성된 Gaussian 랜덤 변수이며,  $\gamma$ 는  $v_{LK}$ 와  $v_{HK}$  사이의 상관계수이다. 또  $\gamma'$ 은  $v_{LK}$ 의 표준편차를 1로 만드는 정규화 상수이다. 먼저  $\gamma'$ 을  $\gamma$ 로 나타내기 위해  $v_{LK}$ 의 분산  $\sigma^2(v_{LK})$ 을 구하면 식(2)에 의해 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \sigma^2(v_{LK}) &= \langle v_{LK}^2 \rangle - \langle v_{LK} \rangle^2 \\ &= \gamma'^2 \langle v_K'^2 \rangle + \gamma^2 \langle v_{HK}^2 \rangle \\ &= \gamma'^2 + \gamma^2 = 1 \end{aligned} \quad (3)$$

여기에서  $\langle \rangle$ 는 평균을 나타낸다. 식 (2)와 (3)으로부터  $v_{HK}$ 와  $v_{LK}$ 의 관계를 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{LK} = \sqrt{1-\gamma^2} v_K' + \gamma v_{HK} \quad (4)$$

이와 같이  $v_{HK}$ 과  $v_{LK}$ 는  $\gamma$ 라는 상관계수를 통하여 서로 연관성을 가지게 된다.  $v_{HK}$ 와  $v_{LK}$  사이에 상관관계가 없으면  $\gamma=0$ 이므로  $v_{LK}$ 가  $v_K'$ 이 되는 반면,  $v_{HK}$ 와  $v_{LK}$ 가 완전한 음의 상관관계가 있을 때에는  $\gamma=-1$ 이므로  $v_{LK}$ 가  $-v_{HK}$ 가 된다. 독립적으로 생성된  $v_{HK}$ 와  $v_K'$ , 그리고 이 두 랜덤 변수의 선형조합인 (4)식으로 주어지는  $v_{LK}$ 를 이용하여 랜덤 변이가 있는 실제 반주

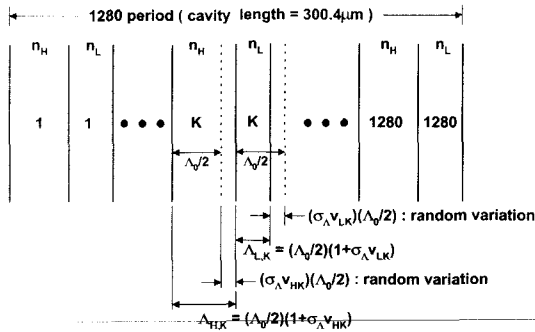


그림 1. 인접한 회절격자 반주기 길이의 랜덤 변이 사이에 음의 상관관계가 있는 회절격자의 구조

Fig. 1. Grating structure with correlated random fluctuations in the adjacent half period.

기의 길이를 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Lambda_{H,K} &= (1 + \sigma_A v_{HK}) \Lambda_0 / 2 \\ \Lambda_{L,K} &= (1 + \sigma_A v_{LK}) \Lambda_0 / 2 \end{aligned} \quad (5)$$

그러므로 그림 1에 보인 것처럼 K번째 주기의 실제 길이는  $\Lambda_K = \Lambda_{H,K} + \Lambda_{L,K}$ 가 된다. 여기에서  $\Lambda_H$ 는 높은 굴절률 부분의 반주기이고,  $\Lambda_L$ 은 낮은 굴절률 부분의 반주기,  $\Lambda_0$ 는 회절격자 평균 주기,  $\sigma_A$ 는 scaling factor를 나타낸다. (5)식으로부터 scaling factor  $\sigma_A$ 는  $\Lambda_0/2$ 에 의해 정규화된 표준편차가 됨을 알 수 있다.  $\sigma_A$ 를 0부터 0.05까지 상관관계에 따라 적절히 증가시키며 회절격자 반주기를 계산한 후 유효 굴절률 전달 매트릭스 방법<sup>[5]</sup>으로 주모드의 파장과 거울면 손실  $\alpha_m$ , 주모드와 첫 번째 결모드 사이의 거울면 손실 차이  $\Delta\alpha_m$ , 축방향 주모드 광자밀도의 최대값에 대한 최소값의 비로 정의된 광자밀도비  $S_{max}/S_{min}$ 를 구하였다. 그리고 이 과정을 각각 100개씩 독립적으로 생성된  $v_{HK}$ 와  $v_{K'}$ 의 랜덤 변수 세트에 대하여 상관계수  $\gamma$ 값을 바꾸어가며 반복하였다.  $\gamma$ 는 랜덤 변수 사이에 관계가 전혀 없는 전자빔 lithography와 음의 상관관계를 가지는 optical lithography를 고려하여 0에서 -1까지 단계적으로 바꾸었으며, 거울면 손실은 흡수 손실이 0인 레이저 공진기의 문턱이득으로 정의하였다. 100개의 랜덤 변수 세트는 평균과 표준편차의 오차를 각각 1%와 10%이하로 하는 데에 충분하다. QWS-DFB 레이저의 양쪽 끝 거울면은 완전 무반사 처리되어 있으며 QWS는 공진기의 정중앙에 있다고 가정했고, 회절격자 주기

의 랜덤 변이에 의한 영향만을 보기 위해 분산과 파장의 의존 흡수손실의 효과는 무시하였다. 또한 도파로 구조와 물질에서의 랜덤 변이는 없는 것으로 가정하였다. 랜덤 변이가 없는 이상적인 사각파 형태 회절격자의 결합계수  $x$ 는 아래와 같이 주어진다.

$$x = 2\Delta n / \lambda_B \quad (6)$$

유효 굴절률 차이  $\Delta n$ 은  $n_H - n_L$ 을 나타낸다. 공진기 길이  $L$ 은  $300.4 \mu m$ 로 두었으며  $xL$ 값은 QWS-DFB 레이저에서 spatial hole-burning에 의한 영향이 가장 적은 1.25로 정하였다. (6)식의  $x$ 는 해석에 직접 사용되지는 않았지만, 회절격자의 가장 중요한 특성 변수이므로 환산하여 나타낼 것이다.

### III. 회절격자 반주기의 상관관계가 있는 랜덤 변이가 양 거울면이 완전 무반사 처리된 QWS-DFB 레이저의 특성에 미치는 영향

QWS-DFB 레이저는 공진기 안에 Bragg 파장의 1/4 만큼의 위상천이가 존재하는 구조여서 회절격자 위상천이를 중심으로 Bragg 파장만이 보강간섭을 일으킨다. 이는 Bragg 파장에서 위상천이의 도움을 받아  $2\pi$ 의 정수 배의 위상 발진 조건을 만족시키기 때문에 나타난 결과이며, Bragg 파장에서 벗어난 파장들은 이 위상천이에서 상쇄간섭이 일어나 문턱이득이 커지게 된다. 이처럼 정확한 발진 파장의 선택과 큰 문턱이득 차이는 파장 다중화 방식 시스템의 광원으로 쓰일 수 있는 요인이다. 그렇지만, 유효 결합계수가 커지면서 위상천이 부분의 광자밀도가 매우 높아져서 spatial hole-burning 현상이<sup>[5]</sup> 심해지게 된다. spatial hole-burning은 구동전류가 높을 때, 특히 주모드의 광자가 한 곳으로 모이면 그 곳에서 유도 방출(stimulated emission)이 강하게 일어나 캐리어 밀도가 낮아지면서 굴절률이 높아지고 광이득이 낮아져 생기는 현상이다. 이 현상이 심해지면 위상 천이 오차가 발생하여 Bragg 파장의 보강간섭이 약화되면서 문턱이득이 높아져 단일 모드 안정성이 나빠진다. 따라서 QWS-DFB 레이저의 단일 모드 안정성을 높이기 위해서는 광자밀도비를 낮추어야 하며, 이 때 문턱이득의 차이를 감소시키지 않도록 해야 한다.

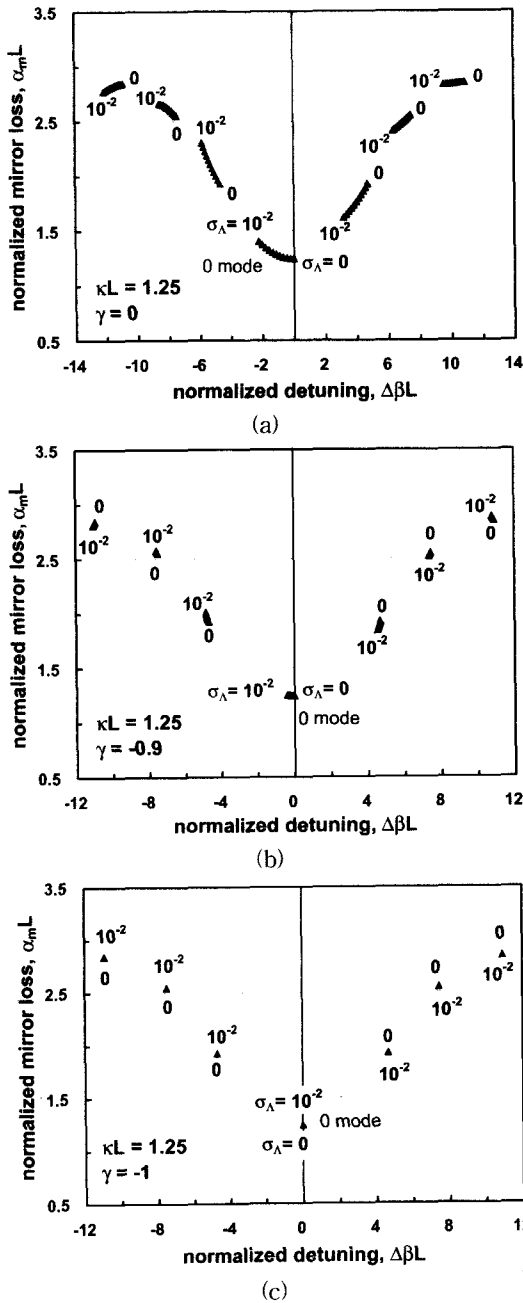


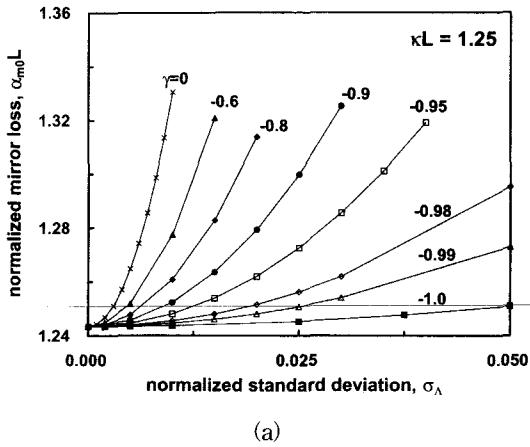
그림 2. 양 거울면이 완전 무반사 처리된 QWS-DFB 레이저에서 상관계수  $\gamma$ 가 a)0, b)-0.9, c)-1.0 일 때 정규화된 표준편차  $\sigma_A$ 에 따른 주요 모드들의 정규화된 detuning과 거울면 손실의 변화

Fig. 2. Changes in the normalized mirror loss and normalized detuning of major modes with the normalized standard deviation  $\sigma_A$  in QWS-DFB lasers with perfectly antireflection-coated facets. The correlation coefficient  $\gamma$  is 0 in (a), -0.9 in (b), and -1.0 in (c).

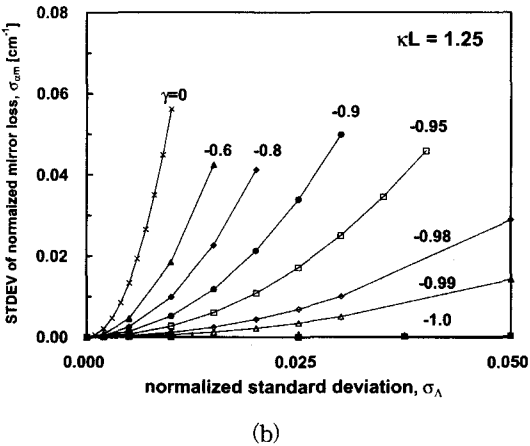
그림 2는 정규화된 결합계수  $\kappa L$ 이 1.25일 때 1개의 랜덤 변수 세트에 대하여 (a)  $\gamma=0$ 과 (b)  $\gamma=-1$ 에 대하여 정규화된 표준편차인  $\sigma_A$ 를 0부터 0.01까지 0.001 간격으로 변화시켜가면서, 각 모드의 거동을 ( $\Delta\beta L, a_m L$ ) 평면에 보인 것이다. 여기에서  $\sigma_A$ 는 회절격자 반주기의 평균값인  $\Lambda_0/2$ 로 정규화된 표준편차로 scaling factor이다.  $\Delta\beta L$ 은 정규화된 detuning으로 Bragg 파장에서 벗어난 정도를 나타내며 아래와 같이 정의된다.

$$\Delta\beta L = 2\pi n_{eff}(1/\lambda - 1/\lambda_B)L \quad (7)$$

$n_{eff}$ 는 유효 굴절률로  $(n_H + n_L)/2$ 이며,  $\lambda$ 와  $\lambda_B$ 는 각각 레이저 파장과 Bragg 파장을 나타내고,  $L$ 은 공진기 길이로  $300.4 \mu m$ 이다. 그리고  $a_m L$ 은 정규화된 거울면 손실을 나타낸다. 모드 번호는 Bragg 파장보다 짧은 파장의 모드 중에 Bragg 파장에 가까운 것부터 +1, +2, ...를, Bragg 파장보다 긴 파장의 모드 중에서 Bragg 파장에 가까운 것부터 -1, -2, ...를 붙였다. 여기에서 거울면 손실은 흡수 손실이 0인 전체 공진기의 발진 문턱 이득으로 정의하였다. 그림 2 (a)에 보인  $\gamma$ 가 0일 때에는  $\sigma_A$ 가 증가함에 따라 첫 번째 결모드의 거울면 손실은 줄어들고 주모드의 거울면 손실은 증가하므로 거울면 손실차이  $\Delta a_m L$ 이 감소하여 단일 모드 안정성이 나빠지고 대칭성이 깨어진다. 또한 주모드 파장이 Bragg 파장으로부터 멀어지게 되어 QWS-DFB 레이저의 파장 정확도가 떨어지게 된다. 특히  $\sigma_A$ 가 0.01보다 커지면 주모드가 -1 모드로 바뀔 수도 있어 파장 정확도와 단일 모드 안정성에 치명적인 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다. 또, 주목해야 할 것은  $\sigma_A$ 가 증가함에 따라 QWS-DFB 레이저 고유의 모드 모습이 사라진다는 점이다. 그러나,  $\sigma_A$ 에 따른 회절격자 반주기의 변화는 발진 파장과 거울면 손실을 동시에 변화시키면서 복잡한 모드 거동을 보인다. 반면에 그림 2(c)에 보인 것처럼  $\gamma$ 가 -1일 때, 즉 회절격자 반주기 사이에 완전한 음의 상관관계가 있어 반주기의 길이는 변하더라도 한 주기의 길이 변화가 없을 때에는  $\sigma_A$ 가 증가함에 따라 각 모드별  $a_m L$ 이나 파장의 변화가 거의 없고 대칭성이 유지된다. 이는 회절격자 반주기 사이의 음의 상관관계가 회절격자 주기의 오차를 줄이는 역할을 하여  $\gamma$ 가 -1이면 주기 오차가 없어지기 때문에 나타나는 현상이다.



(a)



(b)

그림 3. 양 거울면이 완전 무반사 처리된 QWS-DFB 레이저에서  $\kappa L$ 이 1.25일 때  $\sigma_A$ 와 상관계수  $\gamma$ 에 따른 주모드의 정규화된 거울면 손실의 a)평균과 b)표준편차

Fig. 3. (a)Average and (b)standard deviation of the normalized mirror loss of main mode versus  $\sigma_A$  in QWS-DFB lasers with perfectly antireflection-coated facets for several  $\gamma$  values.

그림 2의 결과는 랜덤 변수 세트 한 개에 대한 결과이므로, 이 결과로부터 랜덤 변이의 영향을 일반화시킬 수는 없다. 따라서 더 많은 랜덤 변수 세트에 대한 DFB 레이저 특성의 평균값과 표준편차를 구하는 작업이 필요하다. 랜덤 변수 세트의 개수가 100개이면 평균에서 약 1%, 표준편차에서 약 10%정도의 오차를 보이기 때문에 일반적인 결론을 얻기에 충분하다. 그림 3 (a)와 (b)는 각각  $\kappa L$ 이 1.25일 때  $\sigma_A$ 와 상관계수  $\gamma$ 에 따른 정규화된 주모드 거울면 손실  $\alpha_{m0}L$ 의 평균값과 표준편차  $\sigma_{em}$ 의 변화를 보여준다. 상관계수가 0에서

-1로 가면서  $\alpha_{m0}L$ 의 평균과  $\sigma_{em}$ 의 증가율이 점점 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 상관계수  $\gamma$ 가 -1에 가까워 갈수록 회절격자 주기의 길이 오차가 줄어들어 랜덤 변이의 영향이 줄어들기 때문이다. 이렇게 랜덤 변이에 따라 거울면 손실이 커지는 것은 회절격자에 의하여 실제로 feedback되는 정도를 나타내는 유효 결합계수의 감소로 설명할 수 있으며, 상관계수  $\gamma$ 가 -1로 갈수록 유효 결합계수의 감소율이 작아져 거울면 손실이 증가하는 비율도 작아진다. 회절격자 길이의 랜덤 변이는 각 회절격자에서 feedback되는 빛들 사이의 위상 오차를 주어 실제로 feedback되는 양을 적게 하므로 유효 결합계수를 줄인다.

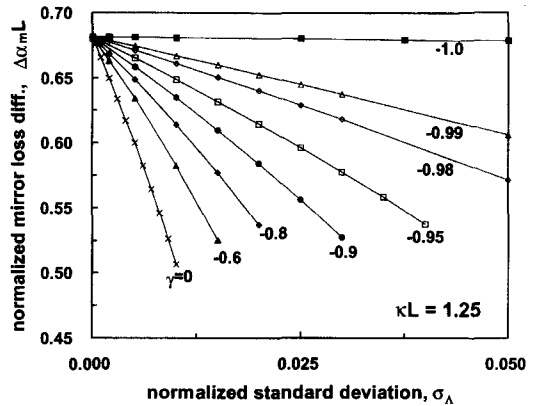


그림 4. 양 거울면이 완전 무반사 처리된 QWS-DFB 레이저에서  $\kappa L$ 이 1.25일 때,  $\sigma_A$ 와 상관계수에 따른 정규화된 거울면 손실 차이

Fig. 4. Normalized mirror loss difference between the main and side modes versus  $\sigma_A$  in QWS-DFB lasers with perfectly antireflection-coated facets for several  $\gamma$  values.

그림 4는  $\kappa L$ 이 1.25일 때 주모드와 첫 번째 결모드 사이의 정규화된 거울면 손실 차이  $\Delta\alpha_{mL}$ 의 변화를  $\gamma$ 와  $\sigma_A$ 에 따라 나타낸 것이다.  $\gamma$ 가 0에서 -1로 가면서  $\sigma_A$ 의 증가에 따른  $\Delta\alpha_{mL}$ 의 감소율이 점점 감소하는 것을 볼 수 있다.  $\gamma$ 가 -1일 때에는  $\sigma_A$ 가 0.05가 되어도  $\Delta\alpha_{mL}$ 의 변화가 거의 없으나  $\gamma$ 가 0으로 갈수록 점점 감소율이 커져서 -0.9만 되어도  $\Delta\alpha_{mL}$  평균값의 감소율이  $\gamma$ 가 0일 때의 감소율의 1/4 정도까지 되는 것을 볼 수 있다.  $\sigma_A$ 의 증가에 따른 주모드 거울면 손

실의 증가와 곁모드 거울면 손실의 감소가 거의 같은 비중으로  $\Delta\alpha_m L$ 의 감소에 기여하고  $\gamma$ 가 -1에 가까이 갈수록 감소율이 줄어들어서 단일 모드 안정성이 덜 나빠지게 된다.

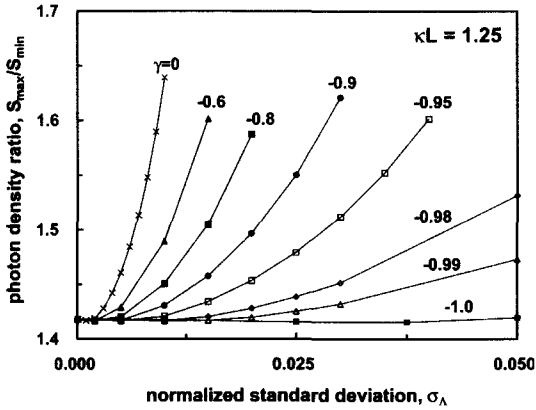
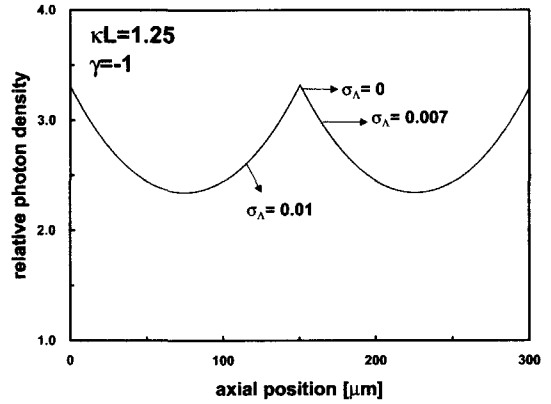


그림 5. 양 거울면이 완전 무반사 처리된 QWS-DFB 레이저에서  $\kappa L$ 이 1.25일 때  $\sigma_A$ 와 상관계수에 따른 주모드 광자밀도비

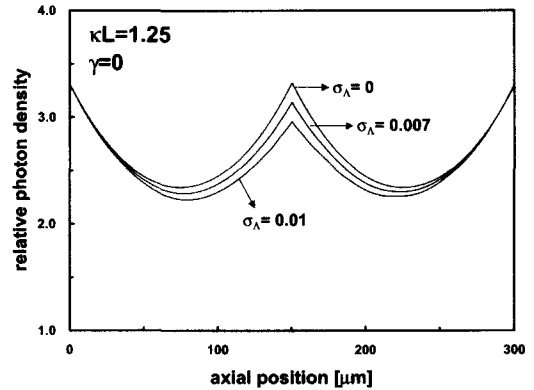
Fig. 5. Photon density ratio versus  $\sigma_A$  in QWS-DFB lasers with perfectly antireflection-coated facets for several  $\gamma$  values.

그림 5는  $\kappa L$ 이 1.25일 때 축방향 주모드 광자밀도의 최대값과 최소값의 비율로 정의한 광자밀도비  $S_{max}/S_{min}$ 의  $\gamma$ 와  $\sigma_A$ 에 따른 변화를 보여준다. 상관계수가 0에서 -1로 가까이 감에 따라  $\sigma_A$ 의 증가에 따른 광자밀도비의 증가율이 점점 줄어들어서 spatial hole-burning의 영향이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이는 상관계수가 -1에 가까워짐에 따라 유효 결합계수의 감소율이 줄어들어 QWS와 거울면 중간 부분에서의  $S_{min}$  감소율이 줄어들기 때문이다. 그림 6은  $\kappa L$ 이 1.25이고  $\gamma$ 가 -1.0, 0일 때 축방향 광자 분포를 나타낸 그림으로 이를 잘 보여준다.  $\gamma$ 가 0일 때에는  $\sigma_A$ 가 0.01이면  $\sigma_A$ 가 0일 때에 비하여 광자밀도비가 약 16% 정도 증가하는 반면  $\gamma$ 가 -1일 때에는  $\sigma_A$ 가 0.05가 되어도 거의 변화가 없고,  $\gamma$ 가 -0.9정도 되어야  $\sigma_A$ 가 0.025에서 약 9%정도 증가한다. 이러한 주모드 광자밀도비의 불균일성은 단일 모드 안정성에 매우 큰 영향을 준다.<sup>[6]</sup> 광자밀도비의 불균일성이 크면 클수록 spatial hole-burning현상이<sup>[6,7]</sup> 심해져서 단일 모드 안정성이 나빠지게 된다. 따라서  $\kappa L$ 이 1.25일 때에는 상

관계수가 -1에 가까워지는 것이 문턱이득 차이도 덜 줄어들고 광자밀도비도 덜 커지기 때문에 단일 모드 안정성을 위해서 바람직함을 알 수 있다. 그림 6으로부터, 광자밀도비의  $\sigma_A$  의존성은  $\kappa L$ 에 따라 달라질 수 있음을 알 수 있다.<sup>[4]</sup>



(a)



(b)

그림 6. 양 거울면이 무반사 처리된 QWS-DFB 레이저에서  $\kappa L$ 이 (a)  $\gamma = -1.0$ 과 (b)  $\gamma = 0$ 일 때  $\sigma_A$ 에 따른 축방향 광자밀도 분포

Fig. 6. Changes in the axial photon density profile with  $\sigma_A$  in QWS-DFB lasers with perfectly antireflection-coated facets for  $\gamma$  of (a) -1.0 and (b) 0.

회절격자 반주기의 랜덤 변이는 파장 정확도에도 큰 영향을 미친다. QWS-DFB 레이저의 파장 변이는 회절격자 주기의 랜덤 변이에 따른 변이와, 발진 문턱이득 변이에 따른 유효 굴절률 변화에서 비롯된 변이로 나누어 볼 수 있다. 도파로 유효 굴절률은 도파로를 구성하는 에피층의 구성 물질과 두께, 발진문턱에서의 캐리

어 밀도, 도파로의 폭 등의 영향을 받으며, 이를 수식으로 표시하면 아래와 같다.<sup>[11]</sup>

$$\delta n_{eff} = \frac{\partial n_{eff}}{\partial t} \cdot \delta t + \frac{\partial n_{eff}}{\partial \lambda_{PL}} \cdot \delta \lambda_{PL} + \frac{\partial n_{eff}}{\partial W} \cdot \delta W - \frac{\lambda \alpha}{4\pi} \cdot \delta g_{th} \quad (7)$$

식 (7)에서 첫 번째 항은 에피층의 두께 변이에 따른 유효 굴절률 변이를 나타내고, 두 번째 항은 photoluminescence 파장 λ<sub>PL</sub>에 의해 특징지워지는 에피층 구성 물질의 변이, 세 번째 항은 도파로 폭의 변이, 그리고 마지막 항은 문턱이득 변이에 따른 굴절률 변화에 의해 생기는 변이를 나타낸다. 여기에서, 선폭 확대 계수(lineewidth enhancement factor) α는 능동 영역으로 주입된 캐리어에 의한 유효 굴절률 변화율과 이득 변화율의 비율과 관계되며  $-\frac{4\pi}{\lambda} \frac{(dn_{eff}/dN)}{(dg/dN)}$ 로 나타낼 수 있다. 이 연구에서는 도파로의 구성 물질과 구조에 의한 변이는 고려하지 않았으므로 δn<sub>eff</sub>는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\delta n_{eff} = -\frac{\lambda \alpha}{4\pi} \cdot \delta g_{th} \quad (8)$$

그리고, 유효 굴절률 변이와 파장 변이 사이에는 다음의 관계가 성립한다.

$$\delta \lambda = \lambda \cdot \frac{\delta n_{eff}}{n_{g,eff}} \quad (9)$$

위 식에서 n<sub>g,eff</sub>는 각각 유효 굴절률과 유효 군굴절률을, λ는 레이저 파장을 나타내며 n<sub>g,eff</sub>는 n<sub>eff</sub> - λ(∂n<sub>eff</sub>/∂λ)로 주어진다. (8)식을 (9)식에 대입하면 문턱이득 변이에 따른 파장 변이는 다음과 같이 주어진다.

$$\delta \lambda = -(\lambda^2 \alpha / 4\pi n_{g,eff}) \cdot \delta g_{th} \quad (10)$$

따라서, 파장 변이는 회절격자 주기의 랜덤 변이에 의한 것과 거울면 손실 변이와 선폭 확대 계수에 의한 발진 문턱에서의 유효 굴절률의 변이의 영향이 합해진 것이다.

그림 7은 xL이 1.25일 때 주모드 파장 표준편차 σ<sub>λ</sub>의 σ<sub>λ</sub>와 γ에 따른 변화를 보여 준다. 역시 γ가 0에서 -1로 가까이 감에 따라 σ<sub>λ</sub>의 증가율이 줄어드는 것을

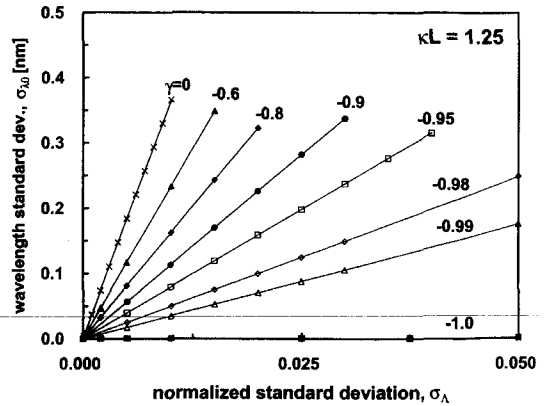


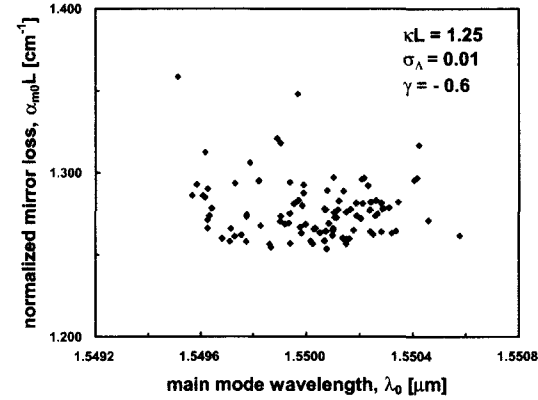
그림 7. 양 거울면이 무반사 처리된 QWS-DFB 레이저에서 xL이 1.25일 때, σ<sub>A</sub>와 상관계수에 따른 주모드 파장의 표준편차

Fig. 7. Standard deviation of the main mode wavelength versus σ<sub>A</sub> in QWS-DFB lasers with perfectly antireflection-coated facets for several γ values.

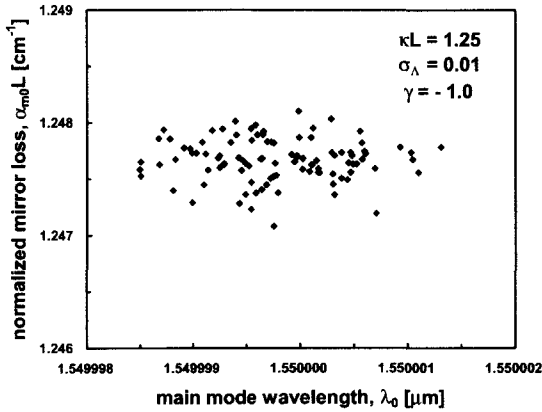
볼 수 있다. 상관계수가 -1일 때에는 σ<sub>A</sub>가 0.05가 되어 도 σ<sub>λ</sub>의 변화가 거의 없으나, γ가 -0.9만 되어도 σ<sub>λ</sub>의 σ<sub>A</sub>에 따른 증가율이 γ가 0일 때의 값의 약 1/3 정도까지 되는 것을 볼 수 있다. 비교를 쉽게 하기 위하여 σ<sub>λ</sub>값이 16채널 파장 다중화 방식의 ITU 표준안 채널 간격의<sup>[1]</sup> 1/4인 0.2nm보다 작게 되는 σ<sub>A</sub>값을 상관 계수별로 살펴보면, γ가 0일 때에는 0.005, -0.8일 때에는 0.012, -0.95일 때에는 0.025, -0.98일 때에는 0.04로, 상관계수가 -1로 가까이 갈수록 회절격자 반주기 랜덤 변이의 허용한계가 커지는 것을 알 수 있다. 주모드 발진 파장과 주모드 거울면 손실 사이의 관계는 그림 8에서 볼 수 있는 것처럼 γ에 관계없이 서로 독립적이므로 주모드 파장 변이의 표준편차 σ<sub>λ</sub>는 (10)식을 써서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{\lambda} = [\sigma_{\lambda 0}^2 + (\lambda^2 \alpha / 4\pi n_{g,eff})^2 (2\sigma_{am}/L)^2]^{1/2} \quad (11)$$

여기에서 σ<sub>λ0</sub>는 그림 6에 보인 회절격자 주기의 랜덤 변이에 의한 주모드 파장의 표준편차를 나타낸다. 그리고 σ<sub>am</sub>은 그림 3(b)에 보인 정규화된 주모드 거울면 손실 α<sub>m0</sub>L의 표준편차이다. 이에 따라 파장 정확도는 선폭 확대 계수 α가 클 때에는 더 많이 나빠지게 된다.



(a)



(b)

그림 8.  $\sigma_A$ 가 0.01이고  $\kappa L$ 이 1.25이며 양 거울면이 무반사 처리된 QWS-DFB 레이저에서 상관 계수가 (a)-0.6, (b)-1일 때 주모드 발진 파장과 거울면 손실 사이의 상관관계

Fig. 8. Correlation between main mode wavelength and mirror loss when  $\gamma$  is (a) -0.6 and (b) -1 in QWS-DFB lasers with  $\kappa L$  of 1.25 and  $\sigma_A$  of 0.01.

#### IV. 결 론

인접한 회절격자 반주기 길이의 변이 사이에 음의 상관관계가 있으면 랜덤 변이가 QWS-DFB 레이저의 성능 저하에 미치는 영향이 줄어든다. 상관계수  $\gamma$ 가 0에서 -1로 갈수록 QWS-DFB 레이저의 주요 특성인 주모드 거울면 손실, 거울면 손실 차이, 주모드 광자밀도비, 주모드 파장 표준편차 등의 변화가 적게 나타난다. 이는 회절격자 반주기 길이의 랜덤 변이 사이의 상관계수  $\gamma$ 가 -1로 가까이 감에 따라 유효 결합계수의 감소율이 줄어들기 때문에 나타난 결과이다. 단일 모드

안정성에 영향을 미치는 것은 거울면 손실 차이와 광자밀도비인데,  $\gamma$ 가 -1로 갈수록  $\sigma_A$ 가 증가함에 따른 거울면 손실차이의 감소량과 광자밀도비의 증가량이 모두 줄어들어서 단일 모드 안정성의 저하가 덜 심각해진다. 주모드 파장 변이에는 두 가지 원인이 있다. 회절격자 주기의 변이에 의한 것과 거울면 손실 변이에 의한 발진 문턱에서의 굴절률 변화에 의한 것이다. 두 번째 효과는 선폭 확대 계수  $a$ 가 4보다 작을 때에는 첫 번째 효과의 1/50 정도가 되어 무시할 수 있을 정도가 된다.  $a$ 가 4보다 작을 때, 16파장 array에서 수율 저하를 무시할 수 있을 정도로 유지하기 위하여<sup>[1]</sup>  $3\sigma_A$ 를 0.4nm보다 작게 하려면  $\gamma$ 가 0일 때는  $\sigma_A$ 가 0.003보다 작아야 하고,  $\gamma$ 가 -0.8일 때는  $\sigma_A$ 가 0.005보다 작아야 하며  $\gamma$ 가 -0.9일 때에는  $\sigma_A$ 가 0.01보다 작아야 한다. 따라서, 개별 레이저를 만들 때에는  $\sigma_A$ 를 같은 수준으로 유지할 수 있다면 회절격자 반주기 사이에 음의 상관관계가 있는 optical lithography를<sup>[3]</sup> 쓰는 것이 회절격자 반주기의 랜덤 변이에 의한 영향을 줄이는 방법이다. 어레이 소자에서처럼 불가피하게 전자빔 lithography를 써야 할 때에는 분해능을 높여 랜덤 변이의 크기를 줄이거나 랜덤 변이 사이에 음의 상관관계를 가지도록 하는 것이 랜덤 변이의 영향을 줄여서 생산 수율을 높이는 데에 유리하다.

#### 참 고 문 헌

[1] T. L. Koch, Laser sources for amplified and WDM lightwave systems, Ch. 4 of Optical Fiber Telecommunications IIIB, ed. by I. P. Kaminow and T. L. Koch, New York, Academic Press, 1997.

[2] K. Sekartedjo, N. Eda, K. Furuya, Y. Suematsu, F. Koyama, and T. Tanbun-Ek, "1.5  $\mu$ m phase-shifted DFB Lasers for single mode operation," Electron. Lett. vol. 20, no 2, pp80-81, January 1984.

[3] K. Utaka, S. Akiba, and Y. Matsushima, " $\lambda/4$  shifted InGaAsP/InP DFB Laser by simultaneous holographic exposure of positive and negative photoresists," Electron. Lett. vol 20, no 20, pp1008-1009, November 1984.



- [4] J.-W. Han, J.-H. Cha, and S.-B. Kim, "Effects of the random fluctuation in grating period on the characteristics of quarter-wavelength-shifted DFB lasers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, no. 12, pp.1569-1571, Dec. 1999.
- [5] 김성한, 김상배, "DFB 레이저의 통합된 설계 변수로서의 광자 분포 중심 I: 저 반사면-고 반사면 구조," 대한 전자공학회 논문지-D, 36권, 12호, pp.1039-1048, 1999년 12월
- [6] 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.
- [7] 이홍석, 김홍국, 김부균, 이병호, "문턱전류이상에 서 구조 및 재료 변수들이  $\lambda/4$  위상천이 DFB 레이저의 단일모드 이득차에 미치는 영향," 대한 전자공학회 논문지-D, 36권, 3호, pp.271-280, 1999년 3월

저 자 소 개



韓 在 雄(學生會員)

1973년 11월 11일생. 1998년 2월 : 아주대학교 전자공학과 졸업(공학사). 2000년 2월 : 아주대학교 전자공학과 졸업(공학석사). 현재 : 삼성전기 연구원

金 相 培(正會員) 第 36卷 D編 第12號 參照

1959년 2월 15일생. 1981년 2월 : 아주대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1983년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(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. 주관심분야 : 광통신용 반도체 레이저 및 부품, 광전 소자 등