

論文 2000-37SD-8-10

# 회절격자 주기의 랜덤 변이가 DFB 레이저 특성에 미치는 영향

## (Effects of the Random Fluctuation in Grating Period on the Characteristics of DFB Lasers)

韓在雄\*, 金相培\*\*

(Jae Woong Han and Sang Bae Kim)

### 요 약

회절격자 주기의 랜덤 변이가 DFB 레이저의 특성에 미치는 영향을 유효 굴절률 전달 매트릭스 방법을 이용하여 해석하였다. 레이저의 양 거울면은 완전 무반사 처리되었다고 가정하였으며, 회절격자 주기의 변이는 Gaussian 랜덤 변수로 표현하였다. 회절격자 주기의 랜덤 변이는 균일 회절격자 DFB 레이저와 QWS-DFB 레이저 스펙트럼의 대칭성을 깨뜨리고 유효 결합계수를 감소시킨다. 이에 따라 균일 회절격자 DFB 레이저에서는  $\pm 1$  모드 거울면 손실의 평균값이 증가하고 금지 대역폭이 감소하며, QWS-DFB 레이저에서는 단일모드 안정성과 파장 정확도가 저하된다. QWS-DFB 레이저의 거울면 손실 차이는 결합계수에 관계없이 회절격자 주기의 랜덤 변이가 커짐에 따라 감소하고, spatial hole-burning 효과는 정규화된 결합계수가 1.5보다 클 때에는 주는 데 반하여 작을 때에는 커진다.

### Abstract

Effects of the random fluctuation in grating half-period have been studied by an effective index transfer matrix method in DFB lasers. The laser facets are assumed to be perfectly antireflection coated, and the period fluctuation is modeled as a Gaussian random variable. The random fluctuation breaks spectral symmetry in both uniform-grating and quarter-wavelength -shifted(QWS) DFB lasers, and decreases the effective coupling coefficient. This leads to increased average mirror loss of  $\pm 1$  modes and reduced stopband width in uniform grating DFB lasers, and degradation in the wavelength accuracy and the single mode stability in QWS-DFB lasers. Threshold gain difference decreases with increasing period fluctuation irrespective of grating coupling coefficient in QWS-DFB lasers, while spatial hole-burning effect is exacerbated or alleviated when the normalized coupling coefficient is lower and higher than 1.5, respectively.

### I. 서 론

인터넷을 비롯한 통신수요의 증가로 대용량 고속 정보통신이 요구되면서 하나의 광섬유에 여러 채널의 정보를 실어보내는 파장 다중화 방식(Wavelength

Division Multiplexing)이 사용되기 시작하였다. 파장 다중화 방식의 통신에서 광원을 array로 할 경우 서로 다른 파장에서 발진하는 다수의 단일 파장 광원이 필수 불가결하다. 이에 따라 고출력 동작이 가능하고 안정된 단일 파장 동작이 가능한 DFB(Distributed Feedback) 레이저가 파장 다중화 방식용 광원으로서 가장 유망하다. 그러나 파장 다중화 방식 통신의 광원은 파장의 정확성과 그 특성의 균일성에 대한 요건이 매우 엄격하기 때문에, DFB 레이저의 특성을 정밀하게

\* 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:2000年3月21日, 수정완료일:2000年7月29日

조절하지 않으면 생산 수율이 낮아 가격이 매우 비싸지게 된다. 이에 따라 DFB 레이저의 성능 변이에 영향을 주는 요소에 대한 연구가 절실히 요구되고 있다.

DFB 레이저의 성능에 영향을 주는 요소에는 활성층 구조, 도파로 구조, 회절격자, 거울면 반사율 등 여러 가지가 있지만, 파장선택 및 단일 파장 동작에 가장 중요한 영향을 미치는 요소는 회절격자 구조이다. 회절격자의 구조변수에는 회절격자의 주기, 높이, 모양, duty-cycle 등이 있는데, 이 변수들이 모두 회절격자의 미세구조와 관련되기 때문에 정밀하게 조절하기 어렵다. 그러므로 회절격자 구조변수의 평균값을 중심으로 한 랜덤 변이가 DFB 레이저 특성에 미치는 영향을 조사하는 일은 DFB 레이저 성능 요건이 엄격해지고 있음에 비추어 매우 의미 있는 일이라 할 수 있다. 그럼에도 불구하고, 랜덤 에러의 영향에 대한 연구는 다층 광필터(multilayer optical filter)에서<sup>[1]</sup> 이루어졌을 뿐 DFB 레이저에 있어서는 매우 부족한 실정이다.

이 연구의 목표는 유효 굴절률 전달 매트릭스 방법을<sup>[2]</sup> 이용하여 회절격자 주기의 랜덤 변이가 DFB 레이저 특성에 미치는 영향을 알아보고 이로부터 회절격자의 제작 공정요건을 정하는 데에 있다. 이 연구 결과는 랜덤 변이의 영향을 최소화할 수 있는 대책을 마련하기 위한 바탕이 된다는 데에서도 큰 의미가 있다고 할 수 있다.

먼저 II장에서는 DFB 레이저 회절격자 주기에 랜덤 변이를 주는 방법을 설명하였다. III장에서는 랜덤 변이가 양 거울면이 완전 무반사 처리된 균일 회절격자 DFB 레이저에 미치는 영향을 알아보았다. 양 거울면이 완전 무반사 처리된 DFB 레이저는 Bragg 파장 양쪽에 있는 두 개의 모드가 거의 동시에 발전하므로 실제로 사용되지는 않지만 랜덤 변이의 영향을 조사하기 위하여 선택하였다. IV장에서는 파장 다중화 방식 시스템의 광원으로 가장 많이 쓰이는 QWS(Quarter-Wavelength-Shifted) DFB 레이저 특성에 미치는 랜덤 변이의 영향을 알아보았다. 마지막으로 V장에서는 III장과 IV장에서 기술한 내용을 바탕으로 결론을 맺는다.

## II. 랜덤 변이의 생성과 해석 방법

실제로 제작되는 사각파 형태의 회절 격자에서 나타날 수 있는 구조적인 변이에는 회절격자 높이  $h$ 와 회절격자 주기  $\Lambda$ 의 변이가 있을 수 있다. embedded 회절

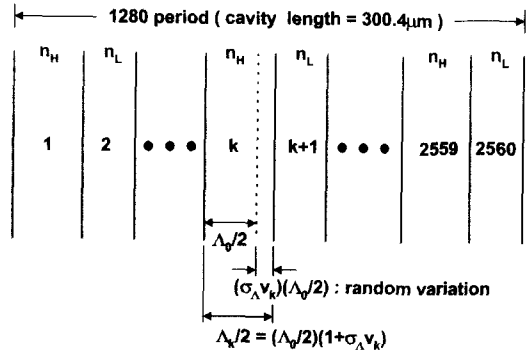


그림 1. 랜덤 변이가 있는 회절격자의 구조  
Fig. 1. Grating structure with random fluctuations in the period.

격자를 쓸 때에는 회절격자 높이가 에피택시로 기른 층의 두께로 주어지기 때문에 수 Å 범위에서 제어가 가능하다는 것과 전체 높이가 2000Å 정도임을 고려하여 이 연구에서는 상대적으로 영향력이 큰 회절격자 주기의 변이만을 고려하기로 한다. 회절격자 각각의 반주기 길이에 랜덤 변이를 주기 위하여 평균이 0이고 표준 편차가 1이면서 Gaussian 확률분포를 갖는 랜덤 변수 세트  $v$ 를 matlab을 이용하여 만들었다. 그림 1에 랜덤 변이를 고려한 DFB 레이저의 회절격자 구조를 나타내었다. 한 세트의 랜덤 변수에는 회절격자 반주기의 수에 해당하는 2560개의 랜덤 숫자가 들어 있다. 이 상적인 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 사각파 회절격자에서 낮은 유효 굴절률,  $n_H$ 는 높은 유효 굴절률을 각각 나타낸다. 랜덤 변이를 고려한 회절격자 반주기의 실제 길이는 다음과 같다.

$$\Lambda/2 = (\Lambda_0/2)(1 + \sigma_\Lambda v) \quad (2)$$

그러므로 그림 1에 보인 것처럼  $k$ 번째 반주기의 실제 길이  $l_k = \frac{\Lambda_k}{2} = \frac{\Lambda_0}{2} (1 + \sigma_\Lambda v_k)$ 가 된다. 여기에서 생성된 랜덤 변수  $v$ 의 평균이 0이므로  $\Lambda_0$ 는 회절격자의 평균 주기가 되며,  $\sigma_\Lambda$ 는 scaling factor이다. (2)식으로부터 scaling factor  $\sigma_\Lambda$ 는  $\Lambda_0/2$ 에 의해 정규화된 표준편차가 됨을 알 수 있다. 랜덤 변수는 회절격자 제

작에 점점 널리 사용되고 있는 전자빔 lithography를 고려하여 서로 상관관계가 없다고 가정하였다.

$\sigma_A$ 를 0부터 0.01까지 0.001만큼씩 증가시켜가며 회절격자 반주기를 계산한 다음, 유효 굴절률 전달 매트릭스 방법으로<sup>[2]</sup> 레이저 특성을 계산하였다. 이 과정을 100개의 랜덤 변수 세트에 대하여 반복하였고 각각의  $\sigma_A$ 에 대하여 레이저 특성의 평균과 표준편차를 구하였다. 100개의 랜덤 변수 세트에 대하여 구한 평균과 표준편차의 정확도는 각각 1%와 10%정도이다. DFB 레이저의 양쪽 끝 거울면은 완전 무반사 코팅이 되어 있다고 가정했고, 회절격자 주기의 랜덤 변이에 의한 영향만을 보기 위해 분산과 파장 의존 흡수손실의 효과는 무시하였다. 또한 도파로 구조와 물질에서의 랜덤 변이는 없는 것으로 가정하였다. 회절격자는 사각과 형태이므로 결합계수  $x$ 는 아래와 같이 주어진다.

$$x = 2\Delta n/\lambda_B \quad (3)$$

여기에서  $\Delta n$ 은  $n_H - n_L$ 을 나타낸다. 공진기 길이  $L=300.4 \mu\text{m}$ 이며,  $xL$ 값은 DFB 레이저 제작에 적합한 1.0에서 2.5까지의 범위에서 변화시켰다.  $xL$ 값은 실제 계산에 사용하지는 않았지만, DFB 레이저의 주요 구조 변수이므로 비교를 위하여 나타내었다.

### III. 회절격자 주기의 랜덤 변이가 양 거울면이 완전 무반사 처리된 균일 회절격자 DFB 레이저 특성에 미치는 영향

이 장에서는 앞장에서 제시된 해석 방법을 이용하여 양 거울면이 완전 무반사 처리된 균일 회절격자 DFB 레이저 특성에 미치는 회절격자 주기의 랜덤 변이의 영향에 대하여 알아보기로 한다. 이 구조의 레이저는 양 거울면이 무반사 처리되었다고 가정하였기 때문에 금지대역 양쪽에 있는 두 개의 모드가 거의 동시에 발전한다. 따라서 실제로는 사용되지 않지만 랜덤 변이의 영향을 조사하기 위하여 선택하였다. 균일 회절격자 DFB 레이저에서 Bragg 파장을 중심으로 하는 금지대 가장자리의 두 모드가 동시에 발전하는 것은 회절격자에 의한 되먹임 위상 발전 조건이 Bragg 파장이 아닌 그 양쪽에서 동시에 만족되기 때문이다.

그림 2는 정규화된 결합계수  $xL$ 이 1.25일 때 하나의 랜덤 변수 세트에 대하여 정규화된 표준편차  $\sigma_A$ 를 0부

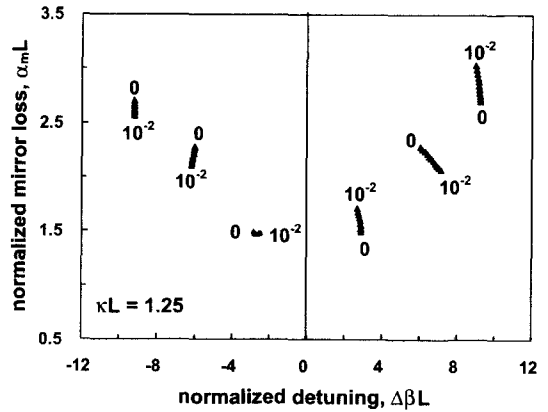


그림 2. 양 거울면이 완전 무반사 처리된 균일 회절격자 DFB 레이저에서 정규화된 표준편차  $\sigma_A$ 가 0에서 0.01까지 변환에 따른 주요 모드들의 정규화된 detuning과 거울면 손실의 변화

Fig. 2. Changes in the normalized mirror loss and normalized detuning of major modes with the normalized standard deviation  $\sigma_A$  in uniform grating DFB lasers with perfectly antireflection-coated facets.

터 0.01까지 0.001 간격으로 변화시켜가면서 각 모드의 거동을  $(\Delta B L, \alpha_m L)$  평면에 나타낸 것이다. 여기에서  $\sigma_A$ 는 회절격자 반주기의 평균값인  $\Lambda_0/2$ 로 정규화된 표준편차로 scaling factor이다.  $\Delta B L$ 은 정규화된 detuning으로 Bragg 파장으로부터 벗어난 정도를 나타내며 아래와 같이 정의된다.

$$\Delta B L = 2\pi n_{eff}(1/\lambda - 1/\lambda_B)L \quad (4)$$

$n_{eff} \equiv (n_H + n_L)/2$ 는 유효 굴절률,  $\lambda$ 와  $\lambda_B$ 는 각각 레이저 파장과 Bragg 파장을 나타내고,  $L$ 은 공진기 길이로  $300.4 \mu\text{m}$ 이다. 그리고  $\alpha_m L$ 은 정규화된 거울면 손실을 나타낸다. 여기에서 거울면 손실은 흡수 손실이 0인 전체 공진기의 발전 문턱 이득으로 정의하였다. 모드 번호는 Bragg 파장보다 짧은 파장의 모드 중에서 Bragg 파장에 가까운 것부터 +1, +2, ... 로, Bragg 파장보다 긴 파장의 모드 중에서 Bragg 파장에 가까운 것부터 -1, -2, ...로 정하였다.

$\sigma_A$ 가 0일 때, 즉 회절격자 주기에 랜덤 변이가 전혀 없을 때에는 Bragg 파장을 중심으로 대칭적인 모습을 보이다가  $\sigma_A$ 가 증가함에 따라 대칭성이 깨어지면서 Fabry-Perot 레이저의 특성에 가까워진다. 또한, +1 모드와 -1 모드 사이의 파장 간격이 감소하고, 거울면 손

실 차이가 증가한다. 균일 회절격자 DFB 레이저에서는 회절격자에 의한 되먹임(feedback) 위상 조건 뿐 아니라 양 거울면의 반사율과 위상 등에 의해 발전 과정이 결정되는데, 여기에서는 회절격자 주기의 랜덤 변이에 의한 영향만을 보기 위하여 양 거울면을 완전 무반사 처리했다고 가정했기 때문에 회절격자에 의한 되먹임 위상조건에 의해서 발전과정이 결정된다. 따라서,  $\sigma_A$ 가 0일 때에는 Bragg 파장을 중심으로 하는 금지대 가장 자리의 두 모드가 동시에 발전하는 균일 회절격자 소자 고유의 특성을 보인다. 그러나,  $\sigma_A$ 가 증가함에 따라 회절격자에 의한 되먹임 위상에 랜덤 변이가 발생하여 DFB 레이저 고유의 특성이 점점 약하게 나타나면서 Fabry-Perot 레이저 특성에 가까워지게 된다. 이는 회절격자 주기의 랜덤 변이가 되먹임(feedback) 위상에 변이를 일으켜서 각각의 회절격자에서의 되먹임 위상을 랜덤하게 변화시켜 회절격자의 영향을 줄이는 역할을 하여 유효 결합계수를 감소시키는 효과를 나타내기 때문이다.

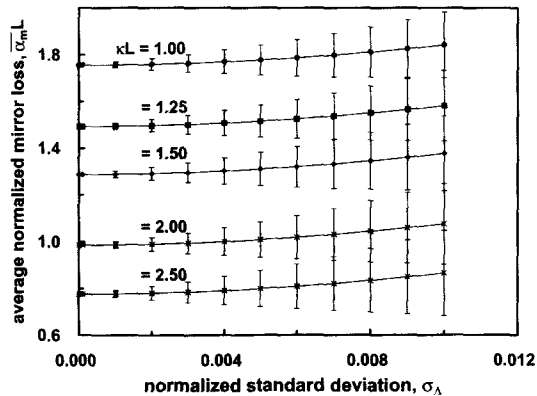


그림 3. 양 거울면이 무반사 처리된 균일 회절격자 DFB 레이저에서  $\sigma_A$ 와 정규화된 결합계수  $xL$ 에 따른  $\pm 1$  모드의 정규화된 평균 거울면 손실  $\overline{a_m L}$ 의 평균값과 표준편차의 변화

Fig. 3. Average normalized mirror loss of  $\pm 1$  modes versus  $\sigma_A$  in uniform grating DFB lasers with perfectly antireflection-coated facets for several  $xL$  values.

그림 2의 결과는 랜덤변수 세트 한 개에 대한 결과이므로, 이 결과로부터 랜덤 변이의 영향을 일반화시킬 수는 없다. 따라서 더 많은 랜덤변수 세트에 대한 DFB 레이저 특성의 평균값과 표준편차를 구하는 작업이 필

요하다. 랜덤 변수 세트의 개수가 100개이면 평균에서 약 1%, 표준편차에서 약 10%정도의 오차를 보이기 때문에 일반적인 결론을 얻기에 충분하다. 그림 3은  $xL$ 이 1.0, 1.25, 1.5, 2.0, 2.5일 때,  $\sigma_A$ 에 따른  $\pm 1$  모드의 정규화된 거울면 손실의 평균 값  $\overline{a_m L}$ 의 100개의 랜덤 변수 세트에 대한 평균값의 변화를 나타낸 것이다. 여기에서  $\overline{a_m}$ 은  $+1$  모드와  $-1$  모드 거울면 손실의 평균 값으로  $(a_{m,+1} + a_{m,-1})/2$ 로 주어진다.  $\sigma_A$ 가 증가함에 따라  $\overline{a_m L}$ 은  $xL$ 에 관계없이 단조 증가한다. 이는 그림 2에서 설명한 바와 같이 회절격자 주기의 랜덤 변이가 증가함에 따라 각각의 회절격자에서의 되먹임 위상에 랜덤 변이가 발생하여 유효 결합계수가 감소하기 때문이다. 물론  $xL$ 이 증가하면서  $\overline{a_m L}$ 이 감소하는 것은  $xL$ 이 커짐에 따라 회절격자에서의 되먹임이 점점 커져서 거울면 손실이 줄어들기 때문이다. 그림 3의 오차막대는  $\pm 1$  모드의 정규화된 거울면 손실 평균  $\overline{a_m L}$ 의 표준편차를 나타내며, 표준편차  $\sigma_{am}$  또한  $\sigma_A$ 가 증가함에 따라 증가한다.

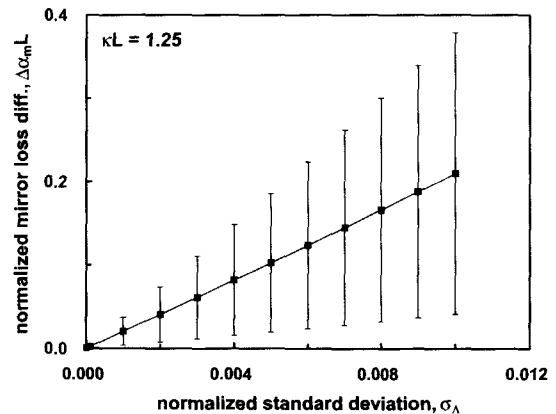


그림 4. 양 거울면이 완전 무반사 처리된 균일 회절격자 DFB 레이저에서  $xL$ 이 1.25일 때  $\sigma_A$ 에 따른 정규화된 거울면 손실 차이의 평균값과 표준편차

Fig. 4. Normalized mirror loss difference between  $\pm 1$  modes versus  $\sigma_A$  in uniform grating DFB lasers with perfectly antireflection-coated facets and  $xL$  of 1.25.

그림 4는  $+1$  모드와  $-1$  모드의 정규화된 거울면 손실 차이  $\Delta a_m L$ 의  $\sigma_A$ 에 따른 변화를 보여준다.  $xL$ 에 대해서는 변화가 작기 때문에  $xL=1.25$ 일 때의 결과만

을 나타냈다.  $\sigma_A$ 가 0일 때에는 Bragg 파장 양쪽의 두 모드가 거의 동시에 발진하므로  $\Delta\alpha_m L$ 이 0에 가까운 값이지만  $\sigma_A$ 가 증가하면서 거의 선형적으로 증가하여  $\sigma_A$ 가 0.01일 때  $\Delta\alpha_m L$ 의 평균이 약 0.2정도로 증가하는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은  $\sigma_A$ 가 증가함에 따라 회절격자 주기가 변하면서 되먹임 위상 차이에 변이가 발생하여 나타난 결과로, +1 모드와 -1 모드에 생기는 보강간섭 감소의 정도가 서로 다르기 때문에 나타난 것으로 해석할 수 있다.  $\Delta\alpha_m L$ 이 증가하는 것은 그 자체로만 보면 단일 모드 안정성이 좋아질 수 있는 요인이지만 실용적인 가치는 없다.

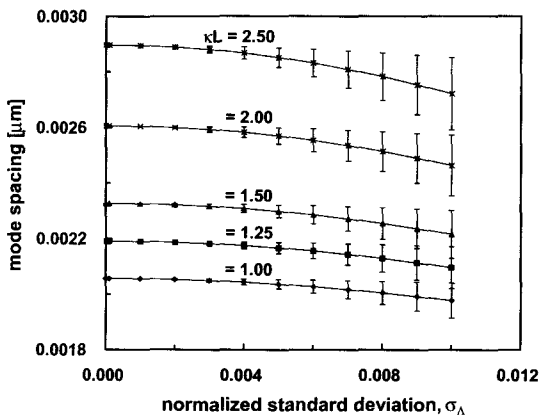


그림 5. 양 거울면이 무반사 처리된 균일 회절격자 DFB 레이저에서  $xL$ 과  $\sigma_A$ 에 따른  $\pm 1$  모드 사이의 모드 간격

Fig. 5. Mode spacing between  $\pm 1$  modes versus  $\sigma_A$  in uniform grating DFB lasers with perfectly antireflection-coated facets for several  $xL$  values.

그림 5는  $xL$ 이 각각 1.0, 1.25, 1.5, 2.0, 2.5일 때  $\sigma_A$ 에 따른 +1 모드와 -1 모드 사이의 파장 간격  $\Delta\lambda$ 의 변화를 나타낸다. 양 거울면이 무반사 처리된 DFB 구조에서 파장 간격  $\Delta\lambda$ 는 결합계수  $x$ 를 구하는 데에 사용되어 왔으며, 근사적으로 다음의 관계가 성립한다.<sup>[3]</sup>

$$xL \approx \frac{\pi}{2} \left( \frac{\Delta\lambda}{\Delta\lambda_{FP}} - \frac{\Delta\lambda_{FP}}{\Delta\lambda} \right) \quad (5)$$

여기에서  $\Delta\lambda_{FP}$ 는 Fabry-Perot 모드 간격이다.  $\Delta\lambda$ 는  $\sigma_A$ 가 증가함에 따라  $xL$ 에 관계없이 감소하는 모습을 보이고, 그 표준편차는 증가하는 모습을 보인다. 이 현

상도 랜덤 변이에 따른 유효 결합계수의 감소로 설명할 수 있다. 그림 5의 결과는 회절격자 구조에 랜덤 변이가 있을 때에는  $\Delta\lambda$ 로부터  $xL$ 을 구하는 것이 무의미할 수도 있음을 보여준다.

결론적으로, 회절격자 주기의 랜덤 변이는 Bragg 파장 양쪽 두 모드에서 동시에 발진하는 균일 회절격자 DFB 레이저 고유의 특성을 없애는 역할을 한다. 이는 회절격자 주기의 랜덤 변이가 각각의 회절격자에서의 되먹임 위상에 변이를 일으켜서 각 모드들에 생기는 보강간섭의 정도를 다르게 만들기 때문이다. 그러므로, 랜덤 변이에 의한 영향이 커질수록  $\pm 1$  모드 사이의 거울면 손실 차이가 증가하고, Bragg 파장을 중심으로 한 모드 거동의 대칭성이 깨어지며, 전반적으로는 Fabry-Perot 레이저의 특성에 가까워진다. 또한, 랜덤 변이는  $\pm 1$  모드의 평균 거울면 손실  $\overline{\alpha_m L}$ 을 증가시키고,  $\pm 1$  모드 사이의 파장 간격  $\Delta\lambda$ 를 감소시킨다. 이 결과 역시 회절격자 주기의 랜덤 변이 때문에 되먹임 위상 차이에 랜덤 변이가 일어나 유효 결합계수가 감소하는 것으로 설명할 수 있다.

#### IV. 회절격자 주기의 랜덤 변이가 양 거울면이 완전 무반사 처리된 QWS-DFB 레이저 특성에 미치는 영향

QWS-DFB 레이저는 Bragg 파장에서 발진하고, 균일 회절격자 DFB 레이저에 비해 뛰어난 파장 정확도와 큰 문턱이득 차이를 보이기 때문에 파장 다중화 방식 광통신 시스템의 광원으로 매우 적합하다. 그렇지만, 채널 수가 늘어나고 채널 간격이 좁아지면서 광원의 파장 정확도에 대한 요구 조건이 점점 엄격해짐에 따라, QWS-DFB 레이저의 파장 정확도에 미치는 도파로 물질/구조와 회절격자 변수의 영향에 대한 연구가 절실하게 되었다. 이 중에서도 특히 회절격자의 반주기는 0.1 $\mu\text{m}$  정도의 크기이므로 랜덤 변이에 의한 영향을 가장 많이 받는다. 이러한 랜덤 변이는 DFB 레이저의 생산 수율과 성능에 큰 영향을 미친다. 이 장에서는 회절격자 주기의 랜덤 변이가 QWS-DFB 레이저의 특성에 어떠한 영향을 미치는지 분석하여 보기로 한다.

QWS-DFB 레이저는 공진기 안에 Bragg 파장의 1/4 만큼의 위상천이가 존재하는 구조이다. 이 레이저에서는 회절격자 위상천이를 중심으로 Bragg 파장만이 보

강간섭을 일으키는데, 이는 위상천이의 도움을 받아  $2\pi$ 의 정수 배의 위상 발진 조건을 만족시키기 때문에 나타난 결과이다. 그리고 Bragg 파장에서 벗어난 파장들은 이 위상천이에서 상쇄간섭이 일어나므로 문턱이득이 커질 수밖에 없다. 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 심해지게 된다. spatial hole-burning 현상은 구동전류가 높을 때, 특히 주모드의 광자가 한 곳으로 모이면 그 곳에서 유도 방출(stimulated emission)이 강하게 일어나 캐리어 밀도가 낮아지면서 굴절률이 높아지고 광이득이 낮아지면서 나타나는 현상이다.<sup>[4,5]</sup> 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 광자 분포를 균일하게 하여야 하며, 이 때 문턱이득의 차이를 감소시키지 않도록 해야 한다.

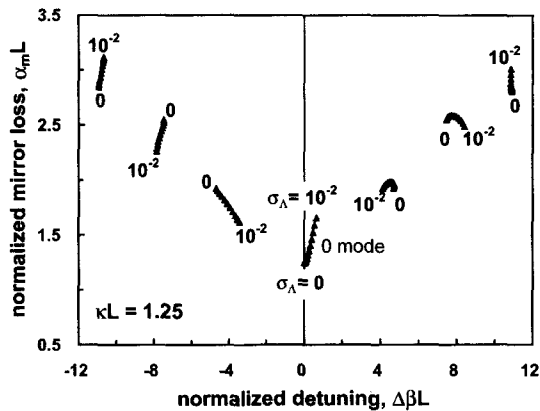


그림 6. 양 거울면이 완전 무반사 처리된 QWS-DFB 레이저에서 정규화된 표준편차  $\sigma_A$ 에 따른 주요 모드들의 정규화된 detuning과 거울면 손실의 변화

Fig. 6. 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.

그림 6은, 한 개의 랜덤 변수 세트에 대해, 정규화된 표준편차  $\sigma_A$ 를 0부터 0.01까지 0.001 간격으로 변화시키면서 모드들의 거동을 ( $\Delta BL, \alpha_m L$ ) 평면에 나타낸 것

이다. 정규화된 detuning  $\Delta BL$ 은 Bragg 파장으로부터 벗어난 정도를 나타내며 식 (4)로 주어진다.  $\alpha_m L$ 은 정규화된 거울면 손실로 앞에서 정의한 것처럼 손실이 없는 공진기의 문턱이득을 뜻한다.  $\sigma_A$ 가 0일 때에는 대칭적인 모습을 보이지만,  $\sigma_A$ 가 증가함에 따라 첫째 결모드의 거울면 손실은 줄어드는 반면 주모드의 거울면 손실이 증가하여 거울면 손실차이  $\Delta \alpha_m L$ 이 감소하므로 단일 모드 안정성이 나빠지고 대칭성이 깨어진다. 또한 주모드 파장이 Bragg 파장으로부터 멀어지게 되어 QWS-DFB 레이저의 파장 정확도가 떨어지게 된다. 특히  $\sigma_A$ 가 0.01일 때에는 주모드가 +1 모드로 바뀌는 현상이 일어나 파장 정확도에 치명적인 영향을 미침을 알 수 있다. 또, 주목해야 할 것은  $\sigma_A$ 가 증가함에 따라 QWS-DFB 레이저의 모드 모습이 Fabry-Perot 레이저와 비슷해지는 경향이다. 그러나,  $\sigma_A$ 에 따른 회절격자 반주기의 변화는 발진 파장과 거울면 손실을 동시에 변화시키기 때문에 복잡한 모드 거동을 보인다.

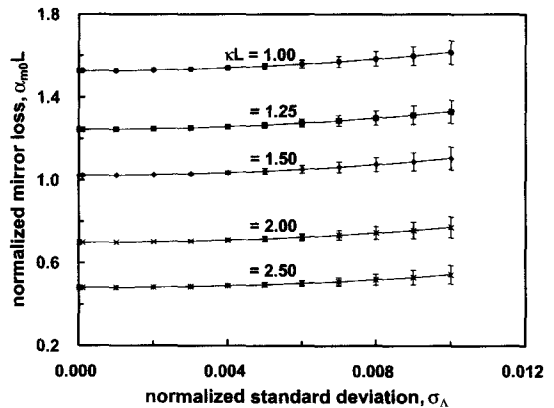


그림 7. 양 거울면이 완전 무반사 처리된 QWS-DFB 레이저에서  $\sigma_A$ 와 정규화된 결합계수  $\kappa L$ 에 따른 주모드의 정규화된 거울면 손실

Fig. 7. Normalized mirror loss of main mode versus  $\sigma_A$  in QWS-DFB lasers with perfectly antireflection-coated facets for several  $\kappa L$  values.

그림 7은  $\kappa L$ 이 1.0, 1.25, 1.5, 2.0, 2.5일 때  $\sigma_A$ 가 증가함에 따라 정규화된 주모드 거울면 손실이 증가하는 모습을 보여준다. 그 증가량은  $\kappa L$ 이 작을수록 미세하게 커진다. 그림 7에 있는 오차막대는 주모드 거울면 손실 변화의  $\pm 1$  표준편차를 나타내고, 표준편차  $\sigma_{am}$

또한  $\sigma_A$ 가 증가함에 따라 증가한다. 거울면 손실이 증가하는 것은 회절격자 주기의 랜덤 변이가 유효 결합 계수를 감소시켰기 때문이다.

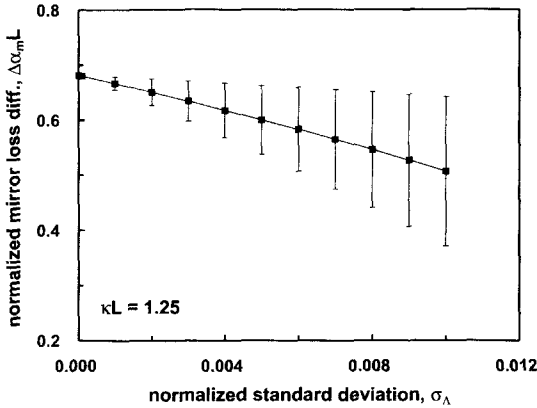


그림 8. 양 거울면이 완전 무반사 처리된 QWS-DFB 레이저에서  $\kappa L$ 이 1.25일 때  $\sigma_A$ 에 따른 정규화된 거울면 손실 차이

Fig. 8. Normalized mirror loss difference between the main and first side modes versus  $\sigma_A$  in QWS-DFB lasers with perfectly antireflection-coated facets and  $\kappa L$  of 1.25.

그림 8은  $\sigma_A$ 에 따른 주모드와 첫 번째 결모드 사이의 정규화된 거울면 손실 차이  $\Delta\alpha_m L$ 의 변화를 보여준다.  $\sigma_A$ 가 증가함에 따라  $\Delta\alpha_m L$ 이 거의 선형적으로 감

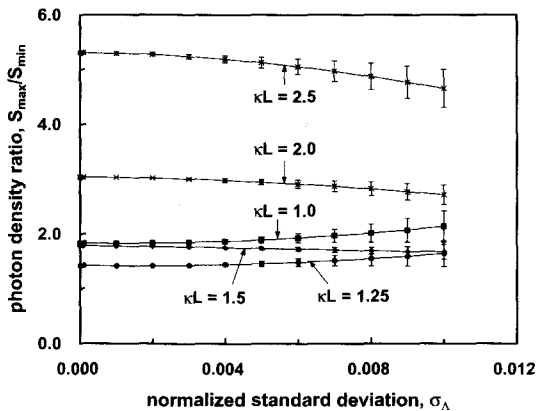
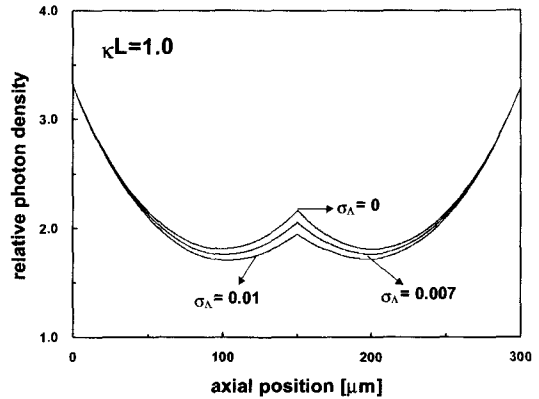


그림 9. 양 거울면이 완전 무반사 처리된 QWS-DFB 레이저에서  $\sigma_A$ 와  $\kappa L$ 에 따른 주모드 광자밀도비

Fig. 9. Photon density ratio versus  $\sigma_A$  in QWS-DFB lasers with perfectly antireflection-coated facets for several  $\kappa L$  values.

소한다.  $\kappa L$ 에 따른 변화는 작기 때문에 spatial hole-burning에 의한 영향이 가장 적은  $\kappa L=1.25$ 일 때의 결과만을 나타냈다.  $\sigma_A$ 가 0.01일 때  $\Delta\alpha_m L$ 의 평균이 약 25%정도 감소하는 것을 볼 수 있다.  $\sigma_A$ 의 증가에 따른 주모드 거울면 손실의 증가와 결모드 거울면 손실의 감소가 거의 같은 비중으로  $\Delta\alpha_m L$ 의 감소에 기여한다.



(a)

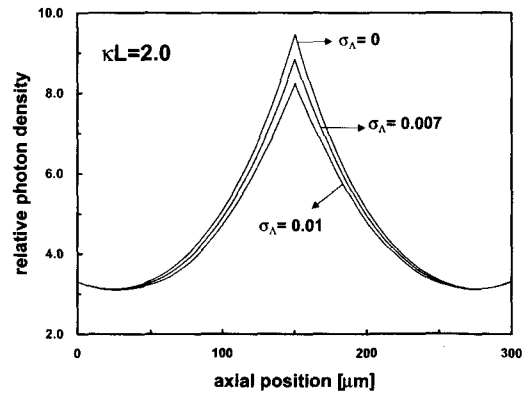


그림 10. 양 거울면이 무반사 처리된 QWS-DFB 레이저에서  $\kappa L$ 이 a)1.0과 b)2.0일 때  $\sigma_A$ 에 따른 축방향 광자밀도 분포

Fig. 10. Changes in the axial photon density profile with  $\sigma_A$  in QWS-DFB lasers with perfectly antireflection-coated facets for  $\kappa L$  of a)1.0 and b)2.0.

DFB 레이저의 단일 모드 안정성은 주모드 광자밀도의 축방향 불균일성에 의해서도 매우 큰 영향을 받는다.<sup>[45]</sup> 그림 9는 축방향 광자밀도의 최대값과 최소값의 비율로 정의한 광자밀도비  $S_{max}/S_{min}$ 의  $\sigma_A$ 에 따른 변화를 보여준다.  $\kappa L$ 이 1.5보다 작을 때에는  $S_{max}/S_{min}$

가  $\sigma_A$ 에 따라 증가하고 1.5보다 클 때에는 반대로 감소하는데 그 이유는  $\sigma_A$ 가 증가함에 따라  $xL$ 이 1.5보다 작을 때에는 QWS 양옆에서  $S_{min}$ 이 감소하고  $xL$ 이 1.5보다 클 때에는 QWS에서  $S_{max}$ 가 감소하기 때문이다. 그림 10은  $xL$ 이 1.0, 2.0일 때 축방향 광자밀도를 나타낸 그림으로 이를 잘 보여준다. 이 또한 회절격자 주기의 랜덤 변이가 증가함에 따라 유효 결합계수가 감소하는 것으로 설명할 수 있다.  $xL$ 이 클 때  $S_{max}/S_{min}$ 가 감소하는 것은 전자빔 lithography로 만든 초기의 QWS-DFB 레이저가  $xL$ 값이 큼에도 불구하고 높은 단일 모드 안정성을 보이는 원인의 하나로 생각할 수 있다.<sup>[6]</sup>

이와 같이 단일 모드 안정성은 회절격자 주기의 랜덤 변이에 의해 큰 영향을 받는다. 랜덤 변이가 증가함에 따라 거울면 손실 차이는 줄어들어 단일 모드 안정성은 나빠진다. 주모드 광자밀도비는  $xL$ 이 1.5보다 작을 때에는  $\sigma_A$ 가 증가함에 따라 증가하여 spatial hole-burning의 영향이 커지고, 1.5보다 클 때에는  $\sigma_A$ 가 증가함에 따라 광자밀도비가 감소하여 spatial hole-burning의 영향이 작아진다.

회절격자 주기의 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 굴절률  $n_{eff}$ 는 도파로를 구성하는 에피층의 구성물질과 두께, 발진문턱에서의 캐리어 밀도, 도파로의 넓이 등의 영향을 받는다. 이를 수식으로 표시하면 아래와 같다.<sup>[7]</sup>

$$\delta n_{eff} = \frac{\partial n_{eff}}{\partial t} \cdot \delta t + \frac{\partial n_{eff}}{\partial \lambda_{PL}} \cdot \delta \lambda_{PL} + \frac{\partial n_{eff}}{\partial W} \cdot \delta W - \frac{\lambda \alpha}{4\pi} \cdot \delta g_{th,0} \quad (6)$$

식 (6)에서 첫 번째 항은 에피층의 두께 변이를, 두 번째 항은 photoluminescence 파장  $\lambda_{PL}$ 로 특징지어지는 에피층 구성 물질의 변이를, 세 번째 항은 도파로 폭에 의한 변이를, 마지막 항은 문턱이득 변이에 따른 굴절률 변화에 의해 생기는 변이를 나타낸다. 마지막 항에서  $\lambda$ 는 레이저 파장,  $\alpha$ 는 선폭 확대 계수,  $\delta g_{th,0}$ 는 주모드 문턱이득의 변이를 나타낸다. 여기에서, 선폭 확대 계수(linewidth enhancement factor)  $\alpha$ 는 능동 영

역으로 주입된 캐리어에 의한 굴절률 변화율을 이득 변화율로 나눈 값으로  $-\frac{4\pi}{\lambda} \frac{(dn/dN)}{(dg/dN)}$ 으로 주어진다. 이 연구에서는 도파로의 구성 물질과 구조에 의한 변이는 고려하지 않았으므로 유효 굴절률 변이  $\delta n_{eff}$ 는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\delta n_{eff} = -\frac{\lambda \alpha}{4\pi} \cdot \delta g_{th,0} \quad (7)$$

그리고 유효 굴절률 변이와 파장 변이 사이에는 다음의 관계가 있다.

$$\delta \lambda = \lambda \cdot \frac{\delta n_{eff}}{n_{g,eff}} \quad (8)$$

위 식에서  $n_{eff}$ 와  $n_{g,eff}$ 는 각각 유효 굴절률과 유효 군굴절률을,  $\lambda$ 는 레이저 파장을 나타내며  $n_{g,eff}$ 는  $n_{eff} - \lambda(\partial n_{eff}/\partial \lambda)$ 로 주어진다. (7)식을 (8)식에 대입하면 주모드 문턱이득 변이  $\delta g_{th,0}$ 에 따른 파장 변이  $\delta \lambda$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\delta \lambda = -(\lambda^2 \alpha / 4\pi n_{g,eff}) \cdot \delta g_{th,0} \quad (9)$$

이와 같이, 파장 변이는 회절격자 주기의 랜덤 변이에 의한 것과 (9)식의 거울면 손실 변이와 선폭 확대 계수에 의한 발진 문턱에서의 유효 굴절률의 변이에 의한 영향이 합하여진 것이다.

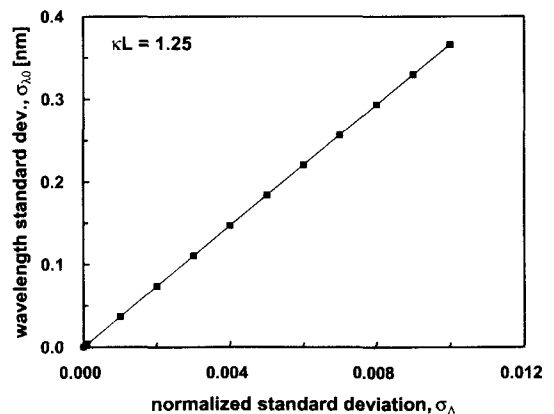


그림 11. 양 거울면이 무반사 처리된 QWS-DFB 레이저에서  $xL$ 이 1.25일 때  $\sigma_A$ 에 따른 주모드 파장의 표준편차

Fig. 11. Standard deviation of the main mode wavelength versus  $\sigma_A$  in QWS-DFB lasers with perfectly antireflection-coated facets for  $xL$  of 1.25.



그림 11은  $xL$ 이 1.25일 때 회절격자 주기 변이만의 영향에 의한 주모드 파장 변이의 표준편차  $\sigma_{\lambda_0}$ 의  $\sigma_A$ 에 따른 변화를 보여 준다.  $\sigma_A$ 가 증가함에 따라  $\sigma_{\lambda_0}$ 가 선형적으로 증가함을 알 수 있다.  $\sigma_A$ 가 0.01이면,  $\sigma_{\lambda_0}$ 가 16채널 파장 다중화 방식 시스템의 ITU 기준안에 명시되어 있는 간격의 거의 절반이 된다.<sup>[7]</sup> 또한  $xL$ 이 커지면서  $\sigma_{\lambda_0}$ 가 약간 커지는 것을 알 수 있는데  $xL$ 이 1.0일 때보다  $xL$ 이 1.25일 때  $\sigma_{\lambda_0}$ 가 약 8.5% 정도 증가한다.

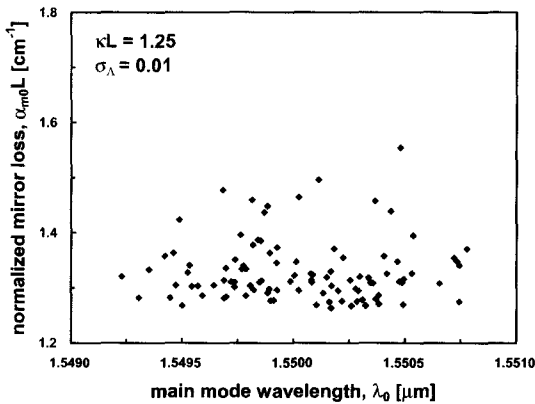


그림 12. 양 거울면이 무반사 처리된 QWS-DFB 레이저에서  $\sigma_A$ 가 0.01이고  $xL$ 이 1.25일 때 주모드 발진 파장에 따른 주모드 거울면 손실의 변화

Fig. 12. Main mode mirror loss versus main mode wavelength in QWS-DFB lasers with perfectly antireflection-coated facets for  $xL$  and  $\sigma_A$  of 1.25 and 0.01, respectively.

앞에서 기술한 바와 같이 문턱 이득과 발진 파장이 선폭 확대 계수(lineewidth enhancement factor)에 의해 서로 연관되어<sup>[7]</sup> 있으므로 파장 정확도를 알아보려면 회절격자 주기 변이의 영향에 주모드 거울면 손실 변이의 영향을 부가적인 효과로 고려해야 한다. 그림 12에 보인 바와 같이 주모드 발진 파장과 거울면 손실의 변이는 서로 독립적이므로, 회절격자 주기의 랜덤 변이에 의한 주모드 파장의 표준편차  $\sigma_{\lambda_0}$ 의 제곱과 유효 굴절률 변이에 의한 주모드 파장 표준편차의 제곱을 각각 더하여 제곱근으로 나타낸 것을 랜덤 변이에 의한 종합적인  $\sigma_{\lambda}$ 값으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{\lambda} = [\sigma_{\lambda_0}^2 + (\lambda^2 \alpha / 4\pi n_g)^2 (2\sigma_{\alpha m} / L)^2]^{1/2} \quad (10)$$

여기에서,  $\sigma_{\lambda_0}$ 는 그림 11에 보인 회절격자 주기의 랜덤 변이에 따른 주모드 파장의 표준편차이고  $\sigma_{\alpha m}$ 은 그림 7에 보인  $\alpha_m L$ 의 표준 편차이다. 이에 따라 파장 정확도는 선폭 확대 계수  $a$ 가 4보다 클 때에는 더 많이 나빠지게 된다.

결론적으로 회절격자 주기의 랜덤 변이는 QWS-DFB 레이저의 단일 모드 안정성과 파장 정확도에 큰 영향을 미친다.  $\sigma_A$ 가 증가함에 따라 주모드 거울면 손실이 증가하고 주모드와 첫 번째 곁모드 사이의 거울면 손실 차이가 감소하여 단일 모드 안정성이 나빠진다. 또, 회절격자 주기의 랜덤 변이는 광자밀도비에도 영향을 주어  $xL$ 이 1.5보다 작을 때에는  $\sigma_A$ 가 증가함에 따라 증가하여 spatial hole-burning의 영향이 커지고, 1.5보다 작을 때에는 spatial hole-burning의 영향이 줄어든다. 이는 회절격자 주기의 랜덤 변이가 되먹임 위상에 변이를 일으켜 유효 결합계수를 감소시켰기 때문에 생긴 결과이다. 파장 정확도에 영향을 미치는 파장 변이의 원인은 회절격자 주기의 랜덤 변이에 의한 것과 발진 문턱에서의 유효 굴절률 변이에 의한 것 두 가지가 있는데 두 번째 것은 선폭 확대 계수가 4보다 작을 때에는 무시할 수 있을 정도로 작은 값이 된다.

## V. 결론

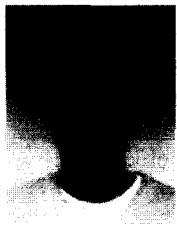
DFB 레이저에서 회절격자 주기의 작은 랜덤 변이도 회절격자 고유의 특성을 크게 약화시킬 수 있음을 유효 굴절률 전달 매트릭스 방법을 이용하여 보였다. 회절격자 주기의 랜덤 변이는 Bragg 파장 양쪽 두 모드에서 동시에 발진하는 균일 회절격자 DFB 레이저 고유의 특성을 없애는 역할을 한다. 이는 회절격자 주기의 랜덤 변이가 되먹임 위상에 변이를 일으켜서 각 모드들에 생기는 보강간섭의 감소 정도를 다르게 만들기 때문이다. 따라서, 랜덤 변이가 커질수록  $\pm 1$  모드 사이의 거울면 손실 차이가 증가하고, Bragg 파장을 중심으로 한 대칭성이 깨어져 Fabry-Perot 레이저의 특성에 가까워진다. 또한, 랜덤 변이는  $\pm 1$  모드의 평균 거울면 손실  $\bar{\alpha}_m L$ 을 증가시키고,  $\pm 1$  모드의 파장 간격  $\Delta\lambda$ 를 감소시킨다. 이 또한 회절격자 주기의 랜덤 변이가 되먹임 위상 차이에 랜덤 변이를 일으켜 유효 결합계수를 감소시키기 때문이다.

QWS-DFB 레이저에서 회절격자 주기의 랜덤 변이는 단일 모드 안정성과 파장 정확도에 큰 영향을 미친다. 거울면 손실의 차이는 회절격자 랜덤 변이의 표준편차  $\sigma_A$ 에 따라 거의 선형적으로 감소하며, 이 감소량이 10%보다 작으려면  $\sigma_A$ 가 0.004 보다 작아야 한다. 회절격자 주기의 랜덤 변이는 광자분포에도 영향을 미쳐서  $xL$ 이 1.5보다 작을 때에는 광자분포의 불균일성과 spatial hole-burning 효과를<sup>[4,5]</sup> 증가시키고, 반대로  $xL$ 이 1.5보다 클 때에는 광자밀도비를 감소시켜 spatial hole-burning 문제를 줄인다. 주모드 파장 변이에는 두 가지 원인이 있다. 회절격자 주기의 변이에 의한 직접적인 것과 거울면 손실 변이에 의한 발진 문턱에서의 굴절률 변화에 의한 것이다. 두번째 효과는 선 폭 확대 계수  $a$ 가 4보다 작을 때에는 무시할 수 있을 정도로 작다.  $a$ 가 4보다 작을 때, 16파장 array에서 수을 저하를 무시할 수 있을 정도로 유지하기 위하여<sup>[7]</sup> 3  $\sigma_A$ 가 0.4nm보다 작게 하려면  $\sigma_A$ 가 0.003보다 작아야 한다.

## 참 고 문 헌

- [1] N. A. Jackman, "Multilayer optical filters with random errors," Bell Labs Technical Journal, vol. 3, no. 1, pp.112-121, Jan.-March 1998.
- [2] 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
- [3] 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  $\mu\text{m}$  InP-InGaAsP distributed feedback lasers," IEEE J. Quantum Electron., vol. 27, no. 4, pp.965-975, April 1991.
- [4] 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.
- [5] 이 홍석, 김 홍국, 김부근, 이 병호, "문턱전류이 상에서 구조 및 재료 변수들이  $\lambda/4$  위상천이 DFB 레이저의 단일모드 이득차에 미치는 영향," 대한 전자공학회 논문지-D, 36권, 3호, pp.271-280, 1999년 3월
- [6] H. Hillmer, S. Hansmann, and H. Burkhard, "1.53  $\mu\text{m}$  InGaAsP-InP first order  $\lambda/4$  -shifted distributed feedback lasers with high coupling coefficient," IEEE J. Quantum Electron., vol. 27, no. 6, pp.1753-1758, June 1991.
- [7] 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.

## 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