

論文99-36D-7-10

# 흡수 회절격자를 가지는 복소결합 다중양자우물 DFB 레이저의 회절격자 구조의 최적화

## (Optimization of Grating Structures in Complex-Coupled MQW DFB Lasers with Absorptive Gratings)

趙成贊\*, 李東燦\*, 金富均\*

(Sung-Chan Cho, Dong-Chan Rhee, and Boo-Gyoun Kim)

### 요 약

흡수 회절격자를 가지는 복소결합 다중양자우물 구조의 DFB 레이저가 작은 문턱이득, 좋은 변조 특성 그리고 작은 선폭계수를 보이며 또한 큰 제작 공차를 가지는 최적의 복소 회절격자 구조를 보였다. 이러한 구조를 찾기 위해 확장된 새로운 층 방법을 사용하여 복소 결합계수와 복소결합계수비를 계산하였으며 흡수 회절격자 층에서의 모달 손실을 포함하는 문턱이득을 직각사각형과 사다리꼴 회절격자에 대하여 계산하였다. 제안된 여러 구조에 대한 계산 결과의 비교를 통하여 작은 문턱이득과 큰 제작 공차를 얻기 위한 설계 지침을 얻었다. 제안된 여러 구조 중에서 이중 회절격자 층 방법을 이용한 구조중 흡수 회절격자가 윗층에 있는 구조가 복소 결합계수의 크기와 문턱이득에 대한 제작 공차가 가장 컸다. 복소결합계수비에 대한 제작 공차는 모든 구조에서 매우 큰 값을 가지고 있어 회절격자 설계시 중요한 고려 대상이 아님을 볼 수 있었다.

### Abstract

We present various optimal grating structures which give the low threshold gain, good modulation characteristics, small effective linewidth enhancement factor, and large fabrication tolerance in complex-coupled MQW DFB lasers with absorptive gratings. To obtain these, we calculate the complex coupling coefficients using the extended additional layer method and the threshold gain including the modal loss in the absorptive grating region for rectangular and trapezoidal gratings. Based on the comparison of the results for various possible absorptive grating structures, the design guidelines are presented to obtain the low threshold gain or large fabrication tolerance. Among the grating structures studied, the double grating structure consisting of the absorptive grating on the index grating has the largest fabrication tolerance for the threshold gain and the coupling strength. The fabrication tolerance for the coupling ratio is very large for all the grating structures studied.

### I. 서 론

광통신 시스템에서 장거리 대용량 전송을 위해서는 선 폭이 좁고 안정된 단일모드로 동작하는 광원이 필요하다.

Distributed-Feedback(DFB) 레이저는 다른 반도체 레이저에 비해 고속의 안정된 단일 모드 동작이 가능하기 때문에 광통신용 소자로 많이 사용되고있다. 기존의 인덱스 결합(index-coupling)에 의한 DFB 레이저는 발진모드의 degeneracy, spatial hole burning 그리고 단면 반사 영향의 문제점이 있었다. Kogelnik과 Shank에 의하여 제안된 복소결합(complex-coupling)에 의한 DFB 레이저는 인덱스 결합 DFB 레이저가 갖고 있는 이러한 문

\* 正會員, 崇實大學校 電子工學科

(Dept. of Electronic Engineering, Soongsil University)

接受日字:1999年4月12日, 수정완료일:1999年6月9日

제점을 감소시킬 수 있어 최근 복소결합 DFB(complex-coupled DFB, C-C DFB) 레이저에 대하여 많은 연구가 진행되고 있다<sup>[1-3]</sup>.

복소결합 DFB 레이저를 제작하는 방법은 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 첫 번째는 활성층을 직접 식각하여 회절격자를 형성하는 방법이다<sup>[3-5]</sup>. 이러한 구조에서는 활성층과 활성층을 덮고있는 영역의 굴절율 차이 때문에 인덱스 회절격자(index grating)가 발생하며 동시에 활성층에서의 광 감금 변조(optical confinement modulation)에 의한 모달 이득(modal gain)의 변조에 의하여 이득 회절격자(gain grating)가 발생하여 복소결합을 얻는다. 두 번째는 활성층외의 영역에 주기적으로 흡수 계수가 변하도록 하는 구조를 만들어 인덱스 회절격자와 모달 손실의 주기적 변화에 의하여 이득 회절격자를 형성하는 방법이다<sup>[4,5]</sup>. 이러한 구조를 흡수 회절격자(absorptive grating)라 한다. 첫 번째 방법의 경우는 활성층에 직접 회절격자를 형성한 다음 재생장(regrowth)하기 때문에 많은 결함(defect)들이 발생한다. 특히 산소 등에 의한 deep-level traps는 nonradiative recombination을 증가 시키어 문턱전류가 증가하고 또한 defect recombination에 의한 주기적인 thermal variation은 크리스탈에 stress를 주어 레이저의 수명을 짧게 하므로 제작에 있어 상당한 주의가 요구된다<sup>[6]</sup>. 또한 모달 이득의 변조에 의하여 발생하는 이득 결합 크기(gain coupling strength)는 그 크기가 제한을 받으며<sup>[7]</sup> 인덱스 결합계수와 이득 결합계수의 비를 조절하기가 어렵다. 두 번째 방법에 의하여 제작되는 흡수 회절격자를 가지는 복소결합 DFB 레이저의 경우 모달 손실의 변조에 의하여 발생하는 이득 결합 크기는 그 크기가 제한을 받지 않으나 추가된 흡수 물질로 인하여 문턱이득(threshold gain)이 증가되어 결합계수의 크기와 함께 흡수계수는 문턱이득을 결정하는 중요한 변수가 된다.

DFB 레이저 구조의 최적화의 목표는 작은 구동 전류로 레이저를 동작시키는 것, 광섬유에서의 분산에 의한 신호왜곡을 최소화 할 수 있도록 chirp을 작게 하는 것, 변조시 대역폭이 넓도록 하는 것, 그리고 side mode suppression ratio(SMSR)를 크게 하여 안정된 단일모드 동작이 가능하도록 하는 것 등이다. 이러한 구조 최적화는 크게 optical cavity, 양자 우물 구조(quantum well structure) 그리고 회절격자 구조의 최적화의 세 부분으로 나누어 볼 수 있다. 즉 광 필드 분포와 캐리어의 전달(transportation)과 재결합특성의 관점에서 DFB 레이저

구조의 최적화를 생각할 수 있다. 캐리어 전달과 재결합 특성에 의한 이득과 미분이득(differential gain)의 최적화는 활성층 영역 즉 양자우물 구조의 문제이다. 이러한 최적화 과정이 광 필드 분포에 영향을 미칠 수 있다. 그러나 양자우물 구조 최적화가 광필드 분포에 미치는 영향은 다층의 레이저 구조에서 회절격자와 인접한 층의 굴절율이나 두께를 조정하므로써 해결될 수 있으므로 캐리어적 관점에서의 레이저 구조 최적화와 독립적으로 광필드 분포관점에서 회절격자구조 최적화가 가능하다. 흡수 회절격자를 가지는 복소결합 DFB 레이저에서는 회절격자 구조가 소자의 특성을 결정짓는 중요한 파라메타인 복소결합계수의 크기와 복소결합계수비(coupling ratio) 그리고 흡수 회절격자 영역에서 발생하는 모달 손실을 포함하는 문턱이득에 큰 영향을 주기 때문에 복소결합 회절격자 구조의 최적화가 중요하다고 생각된다. 따라서 본 논문에서는 흡수물질에 의한 복소결합 회절격자의 구조 최적화에 대하여 연구하였다.

복소결합계수비가 -1.53일 때 복소결합 DFB 레이저의 변조특성이 향상된다<sup>[8]</sup>. 결합계수의 크기  $|xL| \cong 1.5$  이면 유효선폭계수(effective linewidth enhancement factor)가 작아 처핑(chirping) 특성이 향상되며 SMSR이 향상된다<sup>[9]</sup>. 또한 흡수회절격자를 가지는 복소결합 DFB 레이저는 회절격자 영역의 흡수 물질로 인하여 문턱이득은 크게 증가한다. 따라서 DFB 레이저가 최적으로 동작할 수 있는 복소 결합계수 값과 복소결합계수비를 만족하며 문턱이득을 최소화 할 수 있도록 흡수 회절격자 구조를 설계하는 것은 매우 중요하다. 또한 회절격자 구조 설계시 제작 공정의 오차로 인한 레이저 동작 특성의 변화를 최소화 하여야 하므로 제작 공차(fabrication tolerance)를 최대로 하는 구조에 대하여서도 연구하였다.

복소결합 DFB 레이저의 최적동작을 위해서는 결합계수의 크기 뿐만 아니라 인덱스 결합계수와 이득 결합계수의 비의 조절이 필요하다<sup>[8]</sup>. 따라서 복소결합 회절격자를 제작하기 위해서는 이득 결합계수와는 독립적으로 인덱스 결합계수의 크기를 조절할 필요가 있다. 이러한 방법으로는 단일 회절격자 층 방법(single grating layer method, SGLM)과 이중 회절격자 층 방법(double grating layer method, DGLM)<sup>[10]</sup>이 있다. 본 논문에서는 이러한 두 방법을 사용한 회절격자 구조에 대한 최적화를 고찰하였다.

사각형 회절격자의 경우 각각의 duty cycle에 대해

여 레이저가 좋은 변조 특성과 작은 유효선폭계수를 보이는 최적의 결합계수 크기와 복소결합계수비를 갖도록 회절격자깊이를 설정하여 문턱이득을 계산하면 duty cycle이 0.5에서 작아질수록 문턱이득이 작았다. 사다리꼴 회절격자의 경우는 윗변의 길이에 대하여 밑변의 길이가 작을수록(역사다리꼴 형태가 될수록) 문턱이득이 작아졌다. 복소결합계수의 크기에 대한 제작 공차는 회절격자의 두께를 고정시켰을 때, 사각형 회절격자의 경우는 결합계수가 가장 큰 duty cycle에서, 사다리꼴 회절격자의 경우는 어떤 윗변의 길이를 고정시키고 밑변의 길이의 함수로 계산하였을 때 결합계수가 가장 크게 나타나는 지점에서, 가장 큰 것을 볼 수 있었다. 복소결합계수비의 경우 큰 제작 공차를 가지고 있어 회절격자 설계시 중요한 고려의 대상이 아님을 알 수 있었다. 제안된 여러 구조 중에서 이중 회절격자 증 방법을 이용한 구조중 흡수 회절격자가 위층에 있는 구조가 문턱이득이 가장 작았다. 또한 회절격자 형태의 변화에 대하여 문턱이득과 결합계수의 크기 변화도 가장 작았다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 복소 결합계수와 문턱이득에 대한 수식을 보였다. 3장에서는 여러 형태의 복소회절격자 구조와 최적화에 사용된 중요 구조변수 설정에 대하여 고찰하였다. 4장에서는 계산 결과의 검토를 통해 여러 흡수회절격자 구조에 대한 특성을 비교하였으며 문턱이득을 최소로 할 수 있는 구조와 제작 공차가 큰 구조에 대하여 검토하였다. 마지막으로 5장에서는 결론을 맺었다.

## II. 복소 결합계수 및 문턱이득

그림 1은 흡수 회절격자를 가지는 일반적인 복소결합 다중 양자우물(multi-quantum well, MQW) DFB 레이저의 개념도이다. 그림 1에서와 같이 복소비유전상수가  $z$ 축 방향으로 주기적으로 변화하는 회절격자층이 있을 때 복소비유전상수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_c(x, z) = \epsilon_{r,0}(x) + \sum_{q=0}^{\infty} A_q(x) \exp\left(\frac{2iq\pi z}{\Lambda}\right) + i \sum_{q=-\infty}^{\infty} B_q(x) \exp\left(\frac{2iq\pi z}{\Lambda}\right) \quad (1)$$

여기서  $\epsilon_{r,0}(x)$ 는 unperturbed 구조에서의 비유전상수,  $A_q(x)$ 는 인덱스 회절격자의 푸리에 계수,  $B_q(x)$ 는 이득 회절격자의 푸리에 계수 그리고  $\Lambda$ 는 회절격자의 주

기이다. 흡수회절격자가 그림 1과 같이 사다리꼴 형태인 경우 인덱스 회절격자의 푸리에 계수  $A_q(x)$ 와 이득 회절격자의 푸리에 계수  $B_q(x)$ 는 각각 다음과 같이 표현된다<sup>[11]</sup>.

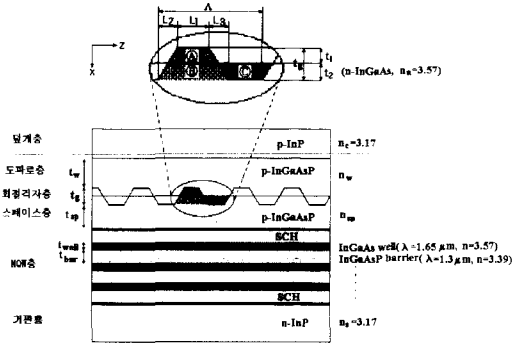


그림 1. 흡수 회절격자를 가지는 일반적인 복소 결합 DFB 레이저의 개념도(A), B 또는 C 영역에 흡수물질이 위치한다)

Fig. 1. Schematic illustration of complex-coupled DFB lasers with absorptive gratings (Absorptive material resides in the region A, B or C).

$$A_q(x) = \frac{(n_b^2 - n_i^2)}{q\pi} \text{Exp}\left[i \frac{2\pi q}{\Lambda} \frac{x}{t_g} (L_2 - L_3)\right] \cdot \sin\left[\frac{q\pi}{\Lambda} \left(L_1 + (L_2 + L_3) \frac{x}{t_g}\right)\right] \quad (2)$$

$$B_q(x) = \frac{n_g}{k_0} \frac{(g_1^2 - g_2^2)}{q\pi} \text{Exp}\left[i \frac{2\pi q}{\Lambda} \frac{x}{t_g} (L_2 - L_3)\right] \cdot \sin\left[\frac{q\pi}{\Lambda} \left(L_1 + (L_2 + L_3) \frac{x}{t_g}\right)\right] \quad (3)$$

여기서  $n$ 과  $g$ 는 각 영역에서의 굴절률과 이득(또는 흡수) 계수이며 아래 첨자  $h$ 와  $l$ 은 각각 굴절률과 이득이 큰 것과 작은 것을 의미하고,  $t_g$ 는 회절격자의 두께,  $q$ 는 회절격자의 차수를 낸다.  $L_1$ ,  $L_2$ , 와  $L_3$ 는 그림 1에서와 같이 각각 사다리꼴의 형태를 나타내는 변수이다.

결합모드 이론에 의한 TE 모드의 복소 결합계수는 다음과 같이 표현된다<sup>[11]</sup>.

$$x = x_i + ix_g \quad (4)$$

여기서  $x_i$ 와  $x_g$ 는 각각 인덱스 결합계수(index coupling coefficient)와 이득 결합계수(gain coupling coefficient)로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$x_i = \frac{k_0^2}{2\beta} \frac{\int_{\text{회절격자층}} A_{q \neq 0}(x) E_y^2(x) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} E_y^2(x) dx} \quad (5)$$

$$\kappa_g = \frac{k_0^2}{2\beta} \frac{\int_{\text{회절격자층}} B_{q \neq 0}(x) E_y^2(x) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} E_y^2(x) dx} \quad (6)$$

여기서  $E_y(x)$ 는 unperturbed 모드의 전계 분포,  $k_0$ 는 자유공간에서의 전파상수 그리고  $\beta$ 는 도파모드의 전파상수이다. 결합모드이론에 의하여 결합계수를 계산할 경우 unperturbed 모드의 필드 분포를 구하기 위하여 unperturbed 광도파로 구조를 설정하여야 한다. unperturbed 광도파로는 회절격자가 임의의 형태를 가지는 경우에도 비교적 정확하게 결합계수를 계산할 수 있는 확장된 새로운 층 방법을 사용하였다<sup>[11, 12]</sup>. 다층 도파관 구조의 unperturbed 모드의 전계분포는 참고문헌 [13]에서 사용한 전달행렬(transfer matrix) 방법을 사용하여 구하였다. MQW DFB 레이저의 경우 양자우물 층 수가 많으면 전달행렬 방법에 의한 unperturbed 모드의 필드 분포 계산에 상당한 시간이 소요된다. 따라서 MQW 영역을 단일 층으로 구조를 단순화하여 행렬의 갯수를 줄이는 등가 층 방법(equivalent layer method)이 정확한 계산결과와 잘 일치하므로 이 방법을 사용하여 unperturbed 모드의 필드 분포를 계산하였다<sup>[14]</sup>.

흡수 회절격자를 가지는 복소결합 DFB 레이저는 흡수 회절격자 영역에서 모달 손실이 발생하기 때문에 발진에 필요한 문턱이득은 흡수 회절격자에 의하여 발생하는 모달 손실을 포함하고 있어야 한다. 따라서 흡수 회절격자 영역을 제외한 영역에서 손실이 발생하지 않는다면 정규화된 문턱이득(normalized threshold gain, NTG)은 다음과 같이 표현된다<sup>[10]</sup>.

$$g_{th}L = \alpha_{th}L + \alpha_{loss}L \quad (7)$$

여기서  $\alpha_{th}$ 는 결합 모드 방정식으로부터 계산된 문턱이득이고  $\alpha_{loss}$ 는 흡수 회절격자에서 발생하는 모달 손실로 다음과 같이 표현된다.

$$\alpha_{loss} = \frac{n_g}{2n_{eff}} \frac{\int_{\text{회절격자층}} B_{q=0}(x) E_y^2(x) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} E_y^2(x) dx} \quad (8)$$

여기서  $B_0(x)$ 는 흡수 회절격자 영역의 평균 흡수계수이다.

### III. 복소회절격자 구조 및 중요 구조변수

복소결합계수비가 -1.53일 때 복소결합 DFB 레이저의

변조특성이 향상되며<sup>[8]</sup> 결합계수의 크기  $|\kappa L| \approx 1.5$  이면 유효선폭계수가 작아 처핑 특성이 향상된다<sup>[9]</sup>. 그러므로 복소결합 DFB 레이저의 최적동작을 위해서는 결합계수의 크기 뿐만 아니라 인덱스 결합계수와 이득 결합계수 비의 조절이 필요하다<sup>[8]</sup>.

따라서 복소결합 회절격자를 제작하기 위해서는 이득 결합계수와는 독립적으로 인덱스 결합계수의 크기를 조절할 수 있어야 한다. 이러한 방법은 두 가지로 분류할 수 있다. 첫 번째는 그림 2에서와 같이 Tada 그룹에서 제안한 구조로 복소회절격자와는 독립적으로 복소회절격자 영역에 있는 인덱스 회절격자와 anti-phase (또는 in-phase)의 인덱스 회절격자를 추가적으로 만들어 주는 방법이다<sup>[10]</sup>. 두 번째는 그림 3과 같이 추가적으로 인덱스 회절격자를 만들어주지 않고 복소회절격자 위에 있는 층의 굴절율의 크기를 조절하여 인덱스 결합계수의 크기를 조절하는 방법이다. 전자를 이중 회절격자층 방법(double grating layer method, DGLM), 후자를 단일 회절격자층 방법(single grating layer method, SGLM)이라 부르겠다.

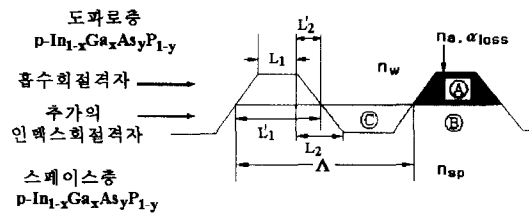


그림 2. 이중 회절격자 층 방법에 의한 복소 회절격자 구조의 개념도

Fig. 2. Schematic diagram of a complex coupled grating using the double grating layer method.

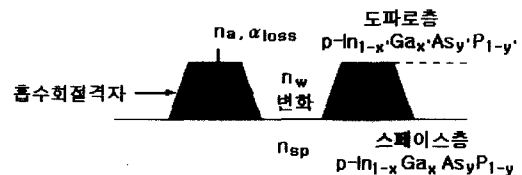


그림 3. 단일 회절격자층 방법에 의한 복소 회절격자 구조의 개념도

Fig. 3. Schematic diagram of a complex coupled grating using the single grating layer method.

이중 회절격자층 방법을 사용할 경우 복소회절격자는 그림 2에서와 같이 영역 (A), (B) 또는 (C)에 흡수물질이

위치할 수 있으며 각각 다른 특성을 보인다. 이중 회절격자 층 구조 중에서 영역 ①, ② 그리고 ③에 흡수물질이 위치하는 구조를 각각 A 구조, B 구조 그리고 C 구조라 하겠다. 단일 회절격자 층 구조는 D 구조라 하겠다.

결합계수의 크기는 전체 광파워 중에서 회절격자 영역에 존재하는 광파워비와 perturbation의 크기 즉 회절격자의 굴절율과 흡수계수의 변조 크기 그리고 푸리에계수의 크기를 결정하는 회절격자의 형태에 의하여 결정된다. 따라서 결합계수의 크기에 영향을 미칠 수 있는 요소들은 각 층의 굴절율과 두께 그리고 회절격자의 두께와 형태이다. 이 모든 요소를 변수로 구조를 최적화 한다는 것은 매우 어려우므로 우선 캐리어적 관점에서 활성층과 separate confinement(SC) 층의 변수들을 최적화된 값으로 설정하고 그 외의 구조변수들 중에서 회절격자 구조 최적화에 중요한 영향을 미치는 변수들을 선정하는 작업이 선행되어야 한다.

양자 우물 구조와 SC 층의 최적화 과정이 광 필드 분포에 영향을 미칠 수 있다. 그러나 양자우물 구조 최적화가 광필드 분포에 미치는 영향은 다층의 레이저 구조에서 회절격자와 인접한 층의 굴절율이나 두께를 조정하므로써 해결될 수 있다. 즉 양자 우물과 barrier의 두께와 갯수가 달라지게 되면 필드 분포에 영향을 주어 활성층 영역의 광강도 뿐만 아니라 회절격자 영역의 광 강도도 변하게 되어 결합계수가 변하게 된다. 그러나 스페이스 층 또는 도파로 영역의 두께나 굴절율을 바꾸어주면 원하는 최적의 결합계수와 복소결합계수비의 값을 갖도록 할 수 있다. 따라서 회절격자의 두께만을 변화시킴으로써 회절격자 구조를 변화시키지 않고 최

적의 결합계수 크기와 결합비를 가질수 있으므로 광 필드 분포 관점에서의 회절격자 구조의 최적화는 캐리어의 재결합에 의한 이득과 미분 이득의 최적화와 관계없이 독립적으로 수행할 수 있다.

SC 층의 두께는 변조 대역폭 또는 변조 속도에 영향을 주기 때문에<sup>[15]</sup> 최적의 값으로 설정하여야 한다. 따라서 양자 우물과 barrier의 두께와 갯수 그리고 SC 층의 두께를 임의의 최적값으로 고정시키면 남겨진 구조변수들은 스페이스 층의 두께와 굴절율, 도파로 영역의 두께와 굴절율이다. 이러한 변수와 회절격자 영역의 두께와 형태를 변화시키어 회절격자 구조 최적화를 수행하였다.

1. 복소 회절격자 구조의 특성 및 최적화에 필요한 중요 구조변수 설정

모든 형태의 회절격자와 구조 변수에 대하여 구조 최적화를 수행할 수 없으므로 기본적인 복소 회절격자 구조인 단일 회절격자 층 구조에 대한 결합계수의 크기 복소결합계수비 그리고 정규화된 문턱이득에 대한 계산 결과의 물리적 이해와 검토를 통하여 회절격자 구조 최적화에 중요한 구조 변수와 방향을 설정하였다. 표 1은 결합계수와 문턱이득의 계산에 사용된 구조 변수들이다. 동작 파장은 1.55  $\mu\text{m}$ , 소자의 길이는 300  $\mu\text{m}$ , 필드 흡수 손실계수는  $1.0 \times 10^4/\text{cm}$ , 양자 우물은  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  그리고 barrier는  $\text{In}_{0.72}\text{Ga}_{0.28}\text{As}_{0.61}\text{P}_{0.39}$ 을 사용한다고 가정하였다. 표 1에서 A, B, C 그리고 D는 각각의 흡수회절격자 구조를 나타낸다.

표 1. 전산모의에 사용된 복소결합 DFB 레이저의 각층의 굴절율과 두께

Table 1. Thickness and refractive index of each layer used for the calculation in complex-coupled DFB lasers.

층	구성 물질	두께 [ $\mu\text{m}$ ]				굴절율			
		A	B	C	D	A	B	C	D
덮개층	InP					3.17			
도파로층	$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$	0.1				3.309	3.309	3.17	3.376
회절격자층	$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$					흡수물질의 굴절율 = 3.57			
스페이스층	$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$	$t_s = 0.1$				3.17	3.17	3.309	3.17
MQW 층 (well 3개)	SCH	0.1				3.39			
	$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ barrier	0.01							
	InGaAs well	0.007							
기판층	InP					3.17			

사각형 회절격자의 경우 회절격자 두께를 고정시키고 duty cycle의 함수로 복소 결합계수를 계산하면 참고 문헌 [11] 과 [12] 에서와 같이 duty cycle이 0.5 보다 약간 큰 지점에서 복소 결합계수의 최대치가 발생한다. 복소 회절격자에서의 손실을 고려하지 않은 문턱이득은 결합계수가 크면 클수록 작기 때문에 이 지점에서 최소치가 발생한다. 그러나 흡수회절격자 영역에서 발생하는 모달 손실은 duty cycle이 크면 클수록 평균 흡수 계수가 커지고 광 감금이 커져 선형적으로 증가한다. 따라서 회절격자 두께가 고정된 경우는 흡수 회절격자에서의 모달 손실을 포함하는 문턱이득이 최소가 되는 duty cycle은 결합계수가 최대로 발생하는 지점보다 작은 쪽으로 이동된다<sup>[10]</sup>.

결합계수 크기  $|xL|=1.5$ 와 복소결합계수비  $r_c = -1.53$ 의 값을 가질 때 복소 결합 DFB 레이저가 최적의 동작특성을 보인다. 가장 간단한 형태인 사각형 회절격자의 경우 여러 duty cycle에 대하여 이러한 값을 만족하는 회절격자의 두께에서 문턱이득과 제작 공차를 계산하였다. 또한 구조 최적화에 필요한 구조 변수의 수를 줄이기 위해 스페이스 층의 두께를 달리 한 계산 결과의 검토를 통하여 스페이스 층의 두께가 구조 최적화에 미치는 영향을 살펴보았다.

표 2는 단일 회절격자층 방법에 의한 직각 사각형 복소 회절격자 구조에서 스페이스 층의 두께  $t_s$ 가 각각  $0.1 \mu\text{m}$ 와  $0.3 \mu\text{m}$ 일 때 여러 duty cycle에 대하여  $|xL|=1.5$ 와  $r_c=-1.53$ 의 값을 가지는 각각의 회절격자 두께에서 흡수 회절격자 영역에서 발생하는 모달 손실  $a_{\text{loss}}L$ , 정규화된 문턱이득  $g_{th}L$ , 그리고 광 감금비에 대한 계산 결과이다. 이 방법의 경우 회절격자의 두께 또는 duty cycle의 함수로 복소결합계수비를 계산하면 복소결합비는 인덱스 결합계수와 이득 결합계수의 푸리에 계수가 같은 비율로 변하며 광 감금은 공통요소이기 때문에 일정한 값을 유지한다.

표 2에서 여러 duty cycle에 대하여 결합계수 값이 일정하도록 회절격자의 두께를 설정하였으므로  $a_{th}L$ 은 일정하다. 단일 회절격자층 구조의 경우는 복소결합비가 duty cycle에 대하여 상수이므로 결합계수의 크기가 일정한 것은 인덱스 결합계수가 일정하다고 생각할 수 있다. 수식 2에서 볼수 있듯이 duty cycle이 감소하면 푸리에계수가 정현함수적으로 감소하기 때문에 일정한 결합계수의 크기를 유지하기 위해서는 광감금이 이 정현함수의 역수 형태로 duty cycle에 대하여

변하여야 한다.

표 2. 단일 회절격자층 방법에 의한 직각 사각형 복소 회절격자에서 스페이스 층의 두께가  $0.1\mu\text{m}$ 와  $0.3\mu\text{m}$ 일 때  $|xL|=1.5$ 와 복소결합계수비  $r_c = -1.53$ 의 값을 가지는 회절격자 두께에서의 모달 손실, 정규화된 문턱이득 그리고 광 감금비

Table 2. The modal loss, normalized threshold gain and confinement factor with the grating depth which gives the coupling strength of 1.5 and coupling ratio of -1.53 when the thickness of space layer,  $t_s$ , is  $0.1\mu\text{m}$  and  $0.3\mu\text{m}$ , respectively.

duty cycle	$\Gamma_{\text{grating}}$	$a_{\text{loss}}L$	$g_{th}L$	회절격자 두께	
				$t_s=0.1$	$t_s=0.3$
0.15	0.035	0.854	1.515	0.0281	0.0513
0.2	0.027	0.879	1.541	0.0218	0.041
0.25	0.022	0.910	1.578	0.0181	0.0348
0.3	0.019	0.958	1.620	0.0157	0.0307
0.35	0.018	1.012	1.679	0.0144	0.0281

그러나 평균 흡수계수는 duty cycle이 증가할수록 선형적으로 증가하므로 평균 흡수계수와 광감금(정현함수의 역수)의 곱에 비례하는 모달 손실은 duty cycle이 작아지면 작아진다. 따라서 문턱이득은 duty cycle이 작을수록 작아지게 된다.

따라서 흡수 회절격자의 형태가 사각형인 경우 레이저가 최적으로 동작하기 위한 결합계수의 크기와 복소 결합계수비를 가지도록 회절격자의 각각의 duty cycle에 대하여 회절격자의 두께를 설정하는 경우 duty cycle이 작을수록 문턱이득이 작다. 반면 결합계수의 최대값이 발생하는 duty cycle이 0.5 인 지점 근처에서 결합계수의 변화가 가장 작기 때문에 결합계수의 크기의 제작 공차는 duty cycle이 0.5인 부근에서 가장 크다<sup>[11, 12]</sup>.

스페이스 층의 두께와 굴절율이 구조 최적화에 미치는 영향을 알아보기 위해 표 2에서 스페이스 층의 두께가  $0.1\mu\text{m}$ 인 경우와  $0.3\mu\text{m}$ 인 경우의 계산 결과를 검토하면 다음과 같다. 스페이스 층의 두께가 다르면 전체 광필드 분포가 변하여 회절격자 영역의 필드 분포

가 변하게 된다. 그러나 결합계수의 크기와 복소 결합 계수비는 스페이스 층의 두께에 관계없이 일정한 값을 가져야 한다. 식(5)와 (6)에서 보는 것 처럼 결합계수는 회절격자의 푸리에 계수와 광 감금비에 의해 결정된다. 회절격자의 형태가 결정되면 푸리에 계수는 결정되기 때문에 같은 결합계수를 가지기 위해서는 스페이스 층이나 도파로 층의 두께에 관계없이 회절격자 층의 광 감금비가 같은 값을 가져야 한다. 따라서 표2에서 보는 것 처럼 스페이스 층의 두께가 달라지면 같은 광 감금비를 유지하기 위하여 회절격자의 두께가 달라지게 되며 그 결과 스페이스 층의 두께에 관계없이 회절격자의 형태에 의하여 문턱이득이 결정된다. 따라서 스페이스 층의 굴절율과 두께 그리고 도파로 영역의 두께와 독립적으로 회절격자의 두께와 형태 그리고 굴절율과 흡수 계수의 크기만으로 구조 최적화를 할 수 있음을 알 수 있다.

Dry etching을 하여 회절격자를 제작할 경우에도 정확하게 사각형 회절격자를 형성하는 것은 매우 어려우며 또한 사다리꼴 형태로 설계하여도 공정상의 오차로 인하여 다른 형태의 사다리꼴 회절격자가 생성될 수 있다. 따라서 문턱이득이 작은 구조와 제작 공차가 큰 구조에 대한 연구는 일반적 형태인 사다리꼴 회절격자에 대하여 수행되어야 한다. 이러한 구조 최적화는 모든  $L_1/\Lambda$ 의 값에 대하여  $L_2/\Lambda$ 의 함수로 수행할 수는 없다. 앞에서의 간략한 설명에서 알 수 있듯이 사각형 회절격자와 사다리꼴 회절격자가 같은 특징을 가지는 것을 예측할 수 있으므로 사각형 회절격자에서와 같이 사다리꼴 형태에서도 몇가지 기본적인 계산을 수행하고 이를 바탕으로 구조 최적화의 방향을 설정할 수 있다.

사다리꼴 회절격자의 경우 고정된  $L_1/\Lambda$ 와 회절격자 두께에서  $L_2/\Lambda$ 를 변화시키면 사각형 회절격자에서 고정된 회절격자 두께에서 duty cycle을 변화시키는 것과 같은 결합계수의 특성을 보인다<sup>[11, 12]</sup>. 또한 흡수 회절격자 영역에서 발생하는 모달 손실도  $L_2/\Lambda$ 가 커질수록 선형적으로 증가한다. 따라서 사다리꼴 회절격자에서  $L_2/\Lambda$ 의 변화에 대한 결합계수와 문턱이득의 변화 특성이 사각형 회절격자에서 duty cycle을 변화시키는 것과 같은 특성을 보인다. 즉 어떤  $L_1/\Lambda$  값에서 여러  $L_2/\Lambda$ 에 대하여  $|xL|=1.5$ 와  $r_c=-1.53$ 의 값을 갖도록 회절격자의 깊이를 설정하

여 문턱이득을 계산하면  $L_2/\Lambda$ 가 작을수록 즉 역 삼각형 쪽으로 갈수록 작아지는 것을 예측할 수 있다. 또한 결합계수의 크기와 문턱이득에 대한 제작 공차는 회절격자 두께를 고정시키고  $L_2/\Lambda$ 의 함수로 계산하였을 때 결합계수가 최대 발생하는  $L_2/\Lambda$ 의 값으로 갈수록 커진다. 직각사각형의 경우 회절격자의 두께를 고정시키고 duty cycle의 함수로 계산하면 0.5보다 약간 큰 duty cycle에서 결합계수 크기의 최대치가 발생하고 0.4이하에서 문턱이득의 최소치가 발생한다. 이러한 특징은 사다리꼴 회절격자의 경우 어떤  $L_1/\Lambda$ 의 값에 대하여  $L_2/\Lambda$ 의 함수로 계산을 하였을 경우 도 잘 일치하여 회절격자의 두께를 고정시키고  $L_2/\Lambda$ 의 함수로 계산하면 결합계수 크기의 최대치가 발생하는  $L_2/\Lambda$ 보다 작은 값에서 문턱이득의 최소점이 존재한다.

지금까지의 계산 결과를 통하여 복소 결합 DFB 레이저의 문턱이득과 제작 공차에 대하여 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다. 사각형 회절격자인 경우는 각각의 duty cycle에 대하여 결합계수의 크기  $|xL|=1.5$ 와 복소결합계수비  $r_c=-1.53$ 을 갖도록 회절격자 두께를 설정하여 문턱이득을 계산하면 duty cycle이 작을수록 작았다. 제작 공차는 회절격자의 두께를 고정시켜 duty cycle의 함수로 계산을 하였을 때 결합계수의 최대값이 발생하는 duty cycle이 큰 지점으로 갈수록 컸다. 따라서 작은 문턱이득과 큰 제작 공차사이에는 trade-off가 존재한다 할 수 있다. 사다리꼴 회절격자의 경우는 어떤  $L_1/\Lambda$ 에 대한  $L_2/\Lambda$ 의 특성이 사각형 회절격자에서의 duty cycle이 갖는 특성과 같음을 알 수 있었다.

#### IV. 계산 결과 및 최적 구조

단일 회절격자 층 방법을 사용한 구조에서 도파로층의 굴절율을 3.38로 놓으면 복소 결합 DFB 레이저가 좋은 변조 특성을 보이는 복소 결합계수비를 만족할 수 있었다. 이중회절격자 층 방법을 이용한 A 구조의 경우는 흡수회절격자에 존재하는 인덱스 회절격자와 anti-phase의 인덱스 회절격자를 추가로 형성시키므로 같은 결합계수의 값을 가지기 위해서는 흡수 회절격자에서의 인덱스 결합계수의 크기가 단일 회절격자 층 방법 보다 커야 한다. 두 경우의 흡수 계수의 크기

가 같다면 A 구조가 이를 만족하기 위해서는 도파로 층의 굴절율이 단일 회절격자 층 방법 보다 작아야 하므로 표 1에서와 같이 3.31로 설정하였다.

이중 회절격자층 구조를 이용한 회절격자 구조 최적화는 추가로 만들어주는 인덱스 회절격자 때문에 인덱스 결합계수의 특성이 단일 회절격자 층 구조와 차이를 보인다. 참고문헌 [10]에서 볼 수 있듯이 사각형 회절격자의 경우 회절격자의 두께에 따른 결합계수의 차이는, duty cycle이 결합계수의 최대치가 발생하는 0.5인 부근으로 갈수록 선형적으로 증가한다. 따라서 흡수 회절격자 영역의 인덱스 회절격자와 그 밑에 추가로 만들어준 인덱스 회절격자가 anti-phase인 A 구조의 전체 인덱스 결합계수는 duty cycle이 0.5인 부분으로 갈수록 선형적으로 증가한다. 같은 이유에서 사다리꼴 회절격자의 경우 A 구조의 경우 어떤  $L_1/\Lambda$ 에 대하여  $L_2/\Lambda$ 가 증가할수록 전체 인덱스 회절격자는 결합계수의 최대치가 발생하는 지점까지 선형적으로 증가한다. 위쪽의 인덱스 회절격자와 아래쪽의 인덱스 회절격자는 그림 2에서 볼 수 있듯이  $L_2/\Lambda$ 가 변하면 위쪽의 인덱스 회절격자는  $L'_2/\Lambda$ 이 변하지만 아래쪽 인덱스 회절격자는  $L'_1/\Lambda$ 와  $L_2/\Lambda$ 가 모두 변하여 사각형 회절격자의 경우와는 다소 차이가 있어 인덱스 결합계수는  $L_2/\Lambda$ 가 증가함에 따라 약간 비선형적으로 증가한다. 이와 같이  $L_2/\Lambda$ 의 값에 따라 인덱스 결합계수가 선형적으로 증가하는 것이 A 구조와 단일 회절격자 층 방법의 다른 점이며 그림 4의 (a)에서 볼 수 있듯이  $L_2/\Lambda$ 가 커질수록 전체 인덱스 결합계수가 선형적으로 증가하고 이득 결합계수도 증가하므로  $|xL|$ 이 선형적으로 증가한다.

⑥에 흡수 물질이 있는 B 구조는 A 구조와는 반대로 흡수 회절격자가 추가로 만들어 주는 인덱스 회절격자의 밑에 위치한다. 따라서  $L_2/\Lambda$ 를 변화시켰을 경우 추가로 만들어주는 인덱스 회절격자의 인덱스 결합계수의 크기보다 흡수 회절격자에 존재하는 인덱스 결합계수가 크고 그림 2에서 볼 수 있듯이  $L'_1/\Lambda$ 와  $L'_2/\Lambda$ 가 동시에 변하기 때문에 A 구조에 비하여 B와 C 구조의 복소 결합계수와 인덱스 결합계수의 변화가 더 크다. 따라서 A 구조가 B와 C 구조에 비하여 사다리꼴 밀변의 길이가 변할 때 결합계수의 크기에 대한 제작공차가 크며 문턱이득의 변화도 작음을 예측할 수 있다. B와 C 구조의 경우 결합계수의 크기

변화가 단일 회절격자 층 구조인 D 구조에 비하여 크게 나타나는 것은 두 경우 흡수 회절격자가 아래의 회절격자 층에 위치하므로  $L_2/\Lambda$ 의 변화에 대하여 이득 결합계수의 변화가 D 구조에 비하여 더 크고 전체 인덱스 결합계수의 변화 또한 크기 때문이다.

흡수 회절격자 영역에서 발생하는 모달 손실을 작게 하기 위하여 A와 B 구조는  $L_1/\Lambda$ 가 0.5보다 작은 값에서 설계하고 C 구조는 0.5보다 큰 구조에서 설계한다. 따라서 ㉔에 흡수 물질이 있는 C 구조와 ㉕에 흡수 물질이 있는 B 구조는 흡수 회절격자가 서로 반전된 형태이므로 계산 결과 사각형 회절격자는  $L_1/\Lambda = 0.5$ 에 대하여, 사다리꼴 회절격자는  $L_1/\Lambda = 0.5$ 와  $L_2/\Lambda = 0$ 에 대하여, 서로 mirror image를 갖는다. 예를 들면  $L_1/\Lambda = 0.15$ 인 B 구조와  $L_1/\Lambda = 0.85$ 인 C 구조는  $L_2/\Lambda$ 의 함수로 계산하였을 경우 그림 4에서 볼 수 있듯이  $L_2/\Lambda = 0$ 에 대하여 mirror image이다. 따라서 결합계수 크기, 복소결합계수비 그리고 정규화된 문턱이득과 제작 공차를 비교하기 위하여 A, B 그리고 D 구조는  $L_1/\Lambda$ 의 값에서 계산을 하였으면 C 구조는  $1 - L_1/\Lambda$ 에서 계산을 하였다.

사각형 회절격자의 경우는 각각의 duty cycle에 대하여  $|xL| = 1.5$ 와  $r_c = -1.53$ 의 값을 갖도록 회절격자의 두께를 설정한 경우 duty cycle이 작을수록 문턱이득이 작음을 볼 수 있었다. 사각형 회절격자 제작시 duty cycle은 0.2 정도까지 제작할 수 있다<sup>[10]</sup>. 따라서  $L_1/\Lambda = 0.15$ 일 때  $L_2/\Lambda = 0$ (사각형 회절격자)인 지점에서  $|xL| = 1.5$ 와  $r_c = -1.53$ 의 값을 갖도록 회절격자의 두께를 설정하여  $L_2/\Lambda$ 의 함수로 계산을 하였다. 또한 사각형 회절격자의 경우는 duty cycle이 0.15일 때 보다는 0.35일 때 문턱이득은 조금 크지만 제작 공차는 크기 때문에  $L_1/\Lambda = 0.35$ 이고  $L_2/\Lambda = 0$ 인 지점에서  $|xL| = 1.5$ 와  $r_c = -1.53$ 의 값을 갖도록 회절격자의 두께를 설정하여 각각의 흡수회절격자 구조에 대하여  $L_2/\Lambda$ 의 함수로 결합계수 크기, 복소결합계수비 그리고 정규화된 문턱이득을 계산하여 각 구조의 특징을 비교하였으며 문턱이득을 최소로 할 수 있는 구조와 제작 공차가 큰 구조에 대하여 연구하였다.

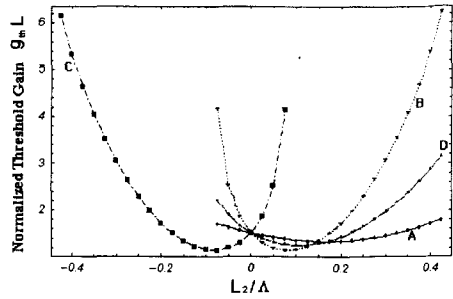
그림 4는 사다리꼴 회절격자의 경우  $L_1/\Lambda = 0.15$ (C 구조의 경우는 0.85)일 때  $L_2/\Lambda = 0$ 에서  $|xL| = 1.5$ 와  $r_c = -1.53$ 의 값을 가지도록 각각의 회



절격자의 두께를 설정하여  $L_2/\Lambda$ 의 함수로 계산한 결합계수 크기, 복소결합계수비, 그리고 정규화된 문턱이득에 대한 계산 결과이다. A, B, C 그리고 D는 각각 A, B, C 그리고 D구조에 대한 계산 결과이다.

복소 결합계수비,  $r_c$ ,가  $-2 < r_c < -1$  일 때  $r_c = -1.53$ 에서 발생하는 최대 대역폭의 90% 이상의 대역폭을 가지므로  $r_c$ 의 허용 범위를  $-2 < r_c < -1$ 로 설정하였다<sup>[8]</sup>. 또한 참고문헌 9에서 볼수 있듯이, 좋은 변조 특성을 보이는 복소결합비를 만족하며 유효전 폭계수가 재료 선평 계수의 0.5 이하가 되는 경우는 결합계수의 크기가 1 보다 큰 값을 가지는 경우이다. 따라서 결합계수 크기의 값의 허용 범위를  $1 < |xL| < 2$ 로 설정하였다.

결합계수 크기의 허용 범위가  $1 < |xL| < 2$  일 때 A, B, C 그리고 D구조의 제작 공차  $\delta L_2/\Lambda$ 는 각각 0.19, 0.06, 0.06 그리고 0.11 이다. 복소결합계수비의 허용 범위가  $-2 < r_c < -1$ 일 때 B(또는 C) 구조의 제작 공차  $\delta L_2/\Lambda$ 의 범위는 0.48이다. A 구조의 경우는 복소결합비가 전구간에 걸쳐 허용 범위내에 있다. 앞 절에서 설명하였듯이 단일 회절격자 층 방법에 의한 D구조는 전구간에 걸쳐 같은 복소결합계수비를 보인다.

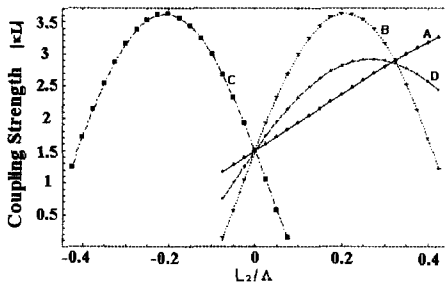


(c) 정규화된 문턱이득

(c) Normalized threshold gain

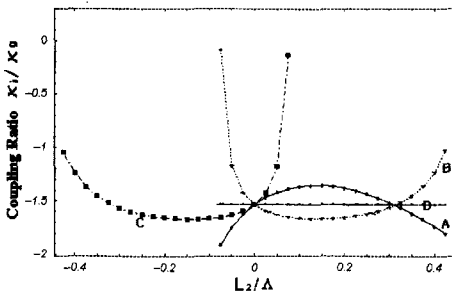
그림 4. 사다리꼴 회절격자의 경우  $L_1/\Lambda=0.15$ (C 구조의 경우는 0.85)일 때  $L_2/\Lambda=0$ 에서  $|xL|=1.5$ 와  $r_c=-1.53$ 의 값을 갖도록 회절격자 두께를 설정하여  $L_2/\Lambda$ 의 함수로 계산한 계산 결과: (a) 결합계수 크기, (b) 복소결합계수비, (c) 정규화된 문턱이득. A, B, C 그리고 D는 각각 A, B, C 그리고 D구조에 대한 계산 결과이다

Fig. 4. The coupling strength, coupling ratio, and normalized threshold gain calculated as a function of  $L_2/\Lambda$  with the grating depth which gives the  $|xL|$  of 1.5 and  $r_c$  of -1.53 at  $L_2/\Lambda=0$ , respectively, for  $L_1/\Lambda=0.15$  (0.85 in the case of structure C) in trapezoidal gratings:(a) coupling strength. (b) coupling ratio. (c) normalized threshold gain. A, B, C and D represent the results for the grating structure A, B, C, and D, respectively.



(a) 결합계수 크기

(a) Coupling strength



(b) 복소결합계수비

(b) Coupling ratio

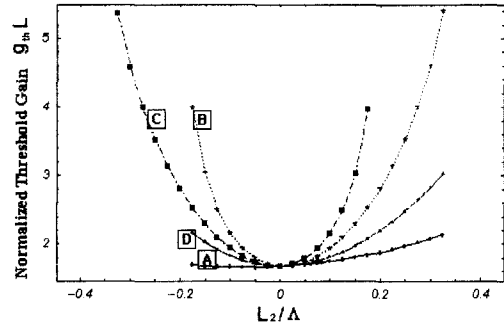
예측한 것과 같이 A 구조가 다른 구조에 비하여 같은  $L_2/\Lambda$ 의 변화에 대하여 결합계수의 변화가 가장 작고 흡수물질 영역의 변화도 가장 작기 때문에 문턱이득의 변화도 작음을 볼 수 있다.

A, B, C 그리고 D 구조의 경우  $L_2/\Lambda=0$ 에서 정규화된 문턱이득이 최소가 아니라 약간 이동된 지점에서 나타난 이유는  $L_2/\Lambda$ 가 커지면 결합계수 크기가 커지기 때문에 문턱이득이 작아진다.  $L_2/\Lambda$ 가 계속 증가하면 결합계수 크기는 그림 4의 (a)에서 볼 수 있듯이 최대값 발생 지점으로 갈수록 증가가 완만하게 되지만 모달 손실은 계속 선형적으로 증가하기 때문에 정규화된 문턱이득은 최소점을 지나면 다시 증가한다. A 구조가 D 구조와 B 구조에 비하여 결합계수와 모달 손실의 변화가 완만하기 때문에 문턱이득에 대한 제작 공차가 크다.

그림 4의 (a)와 (c)에서 볼 수 있듯이 회절격자의 두께를 고정시키고  $L_2/\Lambda$ 의 함수로 결합계수 크기 그리고 정규화된 문턱이득을 계산할 경우 문턱이득이 가장 작은 값을 갖는  $L_2/\Lambda$ 의 값이 존재한다.

그림 4 (a)에서 볼 수 있듯이  $L_1/\Lambda=0.15$ 인 경우 회절격자의 두께를 고정시키고  $L_2/\Lambda$ 의 함수로 계산을 하였을 경우,  $|xL|$ 의 변화는 결합계수의 최대치가 발생하는  $L_2/\Lambda$ 에서 가장 작고,  $L_2/\Lambda$ 가 작을수록(역삼각형 쪽으로 갈수록) 큰 것을 볼 수 있다. 따라서  $L_2/\Lambda=0$  보다는 문턱이득이 최소가 되는  $L_2/\Lambda$ 에서  $|xL|=1.5$ 와  $r_c=-1.53$ 의 값을 가지도록 회절격자의 두께를 설정하여 설계된 경우가 결합계수 크기의 최대치가 발생하는 지점에 근접하고 있어 제작 공차가 큰 것을 볼 수 있다.

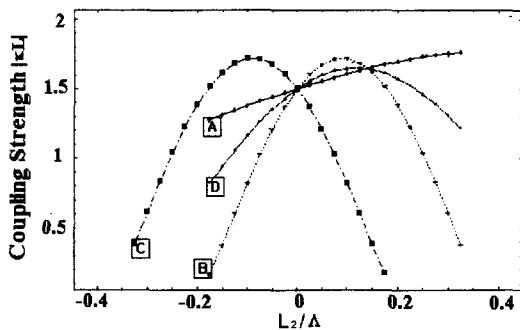
그림 5는 사다리꼴 회절격자의 경우  $L_1/\Lambda=0.35$ (C 구조의 경우 0.65)일 때 각각  $L_2/\Lambda=0$ 에서  $|xL|=1.5$ 와  $r_c=-1.53$ 의 값을 갖도록 회절격자의 두께를 설정하여  $L_2/\Lambda$ 의 함수로 계산한 결합계수의 크기, 복소결합계수비 그리고 정규화된 문턱이득이다.



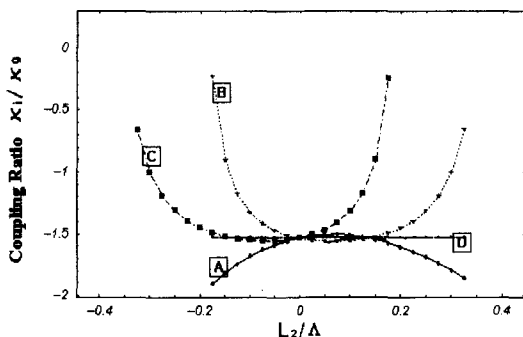
(c) 정규화된 문턱이득  
(c) Normalized threshold gain

그림 5. 사다리꼴 회절격자의 경우  $L_1/\Lambda=0.35$ (C 구조의 경우는 0.65)일 때  $L_2/\Lambda=0$ 에서  $|xL|=1.5$ 와  $r_c=-1.53$ 의 값을 갖도록 회절격자의 두께를 설정하여  $L_2/\Lambda$ 의 함수로 계산한 계산 결과: (a) 결합계수 크기, (b) 복소결합계수비, (c) 정규화된 문턱이득

Fig. 5. The coupling strength, coupling ratio, and normalized threshold gain calculated as a function of  $L_2/\Lambda$  with the grating depth which gives the  $|xL|$  of 1.5 and  $r_c$  of -1.53 at  $L_2/\Lambda=0$  for  $L_1/\Lambda=0.15$  and 0.35(0.85 and 0.65, respectively, in the case of structure C) in trapezoidal gratings: (a) coupling strength, (b) coupling ratio, (c) normalized threshold gain.



(a) 결합계수 크기  
(a) Coupling strength



(b) 복소결합계수비  
(b) Coupling ratio

그림 5 (a)에서 볼 수 있듯이 결합계수 크기의 허용 범위가  $1 < |xL| < 2$  일 때 B(또는 C)와 D구조의 제작 공차  $\delta L_2/\Lambda$ 는 각각 0.33과 0.46이며 A 구조는 전구간이 결합계수 크기의 허용범위 내에 있다. 또한  $L_1/\Lambda = 0.15$ 인 그림 4(a)의 경우와 비교해 보면  $L_2/\Lambda$ 의 변화에 따른 결합계수의 크기 변화가 작음을 볼 수 있다.

그림 5 (b)에서 보면 복소결합계수비의 허용 제작 공차가  $-2 < r_c < -1$ 일 때 제작 공차  $\delta L_2/\Lambda$ 는 B(또는 C) 구조는 0.43 이고 A 구조는 전구간에 허용범위 내에 있다. D 구조는 전구간에 걸쳐 같은 복소결합계수비를 보인다.

그림 5(c)에서 보면 각구조 모두  $L_2/\Lambda=0$  근처에서 문턱이득의 최소치가 발생함을 볼 수 있다. 그림 4(c)와 비교하면 문턱이득이 최소가 되는  $L_2/\Lambda$ 가 작은 값으로 이동하였음을 볼 수 있다. 그림 4 (c)에서과 같이 A, D, 그리고 B(또는 C) 구조 순으로 문턱이득

이  $L_2/\Lambda$ 에 대하여 변화가 작은 것을 볼 수 있다.

고려된 여러 흡수 회절격자 구조 중에서 결합계수 크기에 대한 제작 공차는 A 구조가 가장 컸으며 다음으로 D 구조가 컸다. 또한  $L_1/\Lambda$ 가 큰 값을 가질때가  $L_2/\Lambda$ 의 변화에 대한 결합계수의 크기의 변화가 작음을 볼 수 있었다. 문턱이득의 경우도 A 구조가 다른 세구조에 비하여 전반적으로 작은 값을 가진다. 또한  $L_2/\Lambda$ 의 변화에 따른 문턱이득의 변화도 작아 제작 공차가 가장 크음을 볼 수 있었다. 그 다음으로 D 구조의 제작 공차가 크음을 볼 수 있었다. 복소 결합계수의 경우 D 구조는 사다리꼴 회절격자의 밀변 길이가 변화에 관계없이 일정하였으며 다른 구조들도 큰 제작 공차를 보여 제작 공정상에서 발생하는 오차에 결합계수의 크기나 문턱이득에 비하여 둔감하다는 것을 알았다.

#### IV. 결 론

흡수 회절격자를 가지는 복소 결합 다중 양자 우물 구조의 DFB 레이저에서 제안된 여러 회절격자 구조의 최적화에 대하여 연구하였다. 최적의 구조를 찾기 위해 확장된 새로운 층 방법을 사용하여 복소 결합계수를 계산하였으며 흡수 회절격자 층에서의 모달 손실을 포함하는 문턱이득을 계산하였다. 사각형 회절격자의 경우 여러 duty cycle에 대하여 레이저가 좋은 변조 특성과 작은 유효선폭계수를 보이는 결합계수의 크기와 복소결합계수비를 갖도록 회절격자깊이를 설정하여 문턱이득을 계산하면 duty cycle이 작아질수록 문턱이득이 작았다. 제작시에 발생하는 duty cycle의 오차에 대한 제작 공차는 회절격자의 깊이가 고정된 경우 결합계수의 크기가 최대로되는 duty cycle에서 가장 컸다. 사다리꼴 회절격자의 경우는 밀변의 길이가 작을수록(역삼각형 형태가 될수록) 문턱이득이 작아졌다. 사다리꼴 회절격자의 경우 복소 결합계수와 문턱이득에 대한 제작 공차는 회절격자의 두께를 고정시키고 밀변의 함수로 계산하였을 때 결합계수가 가장 크게 나타나는 지점에서 가장 컸다. 계산 결과 작은 문턱이득과 큰 제작 공차 사이에는 trade-off가 존재하는 것을 알았다. 제안된 여러 구조 중에서 이중 회절격자 층 방법을 이용한 구조중 흡수 회절격자가 윗층에 있는 A 구조가 결합계수의 크기와 문턱이득에 대한 제작 공차가 가장 컸다. 또한 문턱이득의 크기도 거의 모든 제작 가능한  $L_2/\Lambda$  값에서 작음을 볼 수

있었다. 다음으로 단일 회절격자 층 방법을 이용한 구조의 제작 공차가 크음을 볼 수 있었다. 복소 결합비에 대한 제작 공차는 단일 회절격자 층 방법에 의한 구조는 일정하고 나머지 구조들도 큰 제작 공차를 가지고 있어 회절격자 설계시 중요한 고려 대상이 아님을 볼 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

- [1] H. Kogelnik and C. V. Shank, "Coupled-Wave theory of Distributed Feedback Lasers," *J. Appl. Phys.*, vol. 43, no. 5, pp. 2327-2335, 1972.
- [2] G. Morthier, P. Vankwikelberge, K. David, and R. Baets, "Improved Performance of AR-Coated DFB Lasers by the Introduction of Gain Coupling", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 2, no. 3, pp. 170-172, 1990.
- [3] Y. Luo, Y. Nakano, and K. Tada, "Purely gain-coupled distributed feedback semiconductor lasers", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 56, no. 17, pp. 1620-1622, 1990.
- [4] G. P. Li, and T. Makino, "Single-Mode Yield Analysis of Partly Gain-Coupled Multiquantum-Well DFB Lasers", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 5, no. 11, pp. 1282-1284, 1993.
- [5] Y. Luo, Y. Nakano, K. Tada, T. Inoue, H. Hosomatsu, and H. Iwaoka, "Fabrication and Characteristics of Gain-Coupled Distributed Feedback Semiconductor Lasers with a Corrugated Active Layer", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 27, no. 6, pp. 1724-1731, 1991.
- [6] L. A. Coldren and S. W. Corzine, *Diode lasers and photonic integrated circuits*, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1995.
- [7] K. David, J. Buus, G. Morthier, and R. Baets, "Coupling Coefficients in Gain-Coupled Lasers: Inherent Compromise Between Coupling Strength and Loss," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 3, no. 5, pp. 439-441, 1991.

- [ 8 ] A. J. Lowery, and D. Novak, "Performance Comparison of Gain-Coupled and Index-Coupled DFB Semiconductor Lasers", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 30, no. 9, pp. 2051-2063, 1994.
- [ 9 ] K. Kudo, J. I Shim, K. Komori, and S. Arai, "Reduction of Effective Linewidth Enhancement Factor  $a_{eff}$  of DFB Lasers with Complex Coupling Coefficients", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 4, no. 6, pp. 531-534, 1992.
- [ 10 ] H. L. Cao, Y. Luo, Y. Nakano, K. Tada, M. Dobashi, and H. Hosomatsu, "Optimization of Grating Duty Factor in Gain-Coupled DFB Lasers with Absorptive Grating-Analysis and Fabrication", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 4, no. 10, pp. 1099-1102, 1992.
- [ 11 ] Sung-Chan Cho, Boo-Gyoun Kim, and Nadir Dagli, "Extended Additional Layer Method of Calculating the Coupling Coefficient of Arbitrary Shaped Gratings," *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 16, no. 3, pp. 143-145, 1997.
- [ 12 ] Sung-Chan Cho, Boo-Gyoun Kim, and Nadir Dagli, "Ray Optics Determination of the DFB Coupling Coefficient for Trapezoidal Gratings" *J. Lightwave Technol.*, vol. 16, no. 4, pp. 715-720, 1998.
- [ 13 ] M. R. Ramadas, E. Garmire, A. K. Ghatak, K. Thyagarajan, and M. R. Shenoy, "Analysis of absorbing and leaky planar waveguides : a novel method", *Opt. Lett.*, vol. 14, no. 7, pp. 376-378, 1989.
- [ 14 ] Y. F. Li, K. Iizuka, and J. W. Y. Lit, "Periodic stratified structure in a multilayer planar optical waveguide", *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 9, no. 4, pp. 559-568, 1992.
- [ 15 ] R. Nagarajan, M. Ishikawa, T. Fukushima, R. S. Geels, and J. E. Bowers, "High speed quantum-well transport effects," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 28, no. 10, pp. 1990-2008, 1992.

---

 저 자 소 개
 

---

趙成贊(正會員) 第34卷 D編 第7號 參照

1991년 2월 숭실대학교 전자공학과 공학사. 1993년 2월 숭실대학교 전자공학과 공학석사. 1995년 9월 ~ 현재 숭실대학교 전자공학과 박사과정 재학중. 주관심분야는 광소자, 광통신시스템, 광정보장치 등임

李東燦(正會員) 第35卷 D編 第9號 參照

1996년 2월 숭실대학교 전자공학과 공학사. 1999년 2월 숭실대학교 전자공학과 공학석사. 1999년 3월 ~ 맥스전 자주식회사. 주관심분야는 광소자, 광통신시스템, 광정보 장치 등임

金富均(正會員) 第32卷 A編 第3號 參照

1979년 2월 서울대학교 전자공학과 공학사. 1981년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학석사. 1989년 8월 University of Southern California 공학 박사. 1993년 6월 ~ 8월 IBM Almaden 연구소 방문연구원. 1997년 2월 ~ 1998년 2월 University of California at Santa Barbara 방문 교수. 1981년 3월 ~ 현재 숭실대학교 전자공학과 부교수. 주관심분야는 광소자, 광통신 시스템, 광정보장치 등임