

論文95-32A-3-6

# DFB 구조 소자의 자연 방출 스펙트럼에 관한 이론적 해석

## (Theoretical Analysis of the Spontaneous Emission Spectrum of a Device using DFB structures)

金富均\*, 崔智然\*, 丁基碩\*, 趙成贊\*, 李奉永\*\*  
(Boo Gyoun Kim, Jee Yon Choi, Ki Suk Jeung, Sung Chan Cho,  
and Bong Young Lee)

### 요약

결합모드 방정식의 해에 transfer matrix 방법과 다중 반사방법을 사용하여 양 단면 반사와 회절격자의 위상이 고려된 DFB 구조소자의 자연방출 스펙트럼에 관한 analytic 식을 유도하였다. DFB 구조소자의 구조 파라미터들이 자연방출 스펙트럼 및 동작 특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 구조 파라미터들과 자연방출 스펙트럼과의 관계를 구하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 자연방출 스펙트럼과 구조 파라미터들간의 관계 및 자연방출 스펙트럼으로부터 구조 파라미터들의 값을 추정할 수 있는 가능성을 확인하였다.

### Abstract

We derive analytic expressions for the spontaneous emission spectrum of a device using DFB structures including the effects of both facet reflections and the phase of a grating. In the derivation, we have used the transfer matrix and multiple reflection methods to the solution of coupled mode equations. Equations for the relations between the spontaneous emission spectrum and structure parameters of the device are derived to investigate the effect of structure parameters on the spontaneous emission spectrum and operating characteristics of the device. The relations are also verified by computer simulations. Our results show the possibility of evaluating the structure parameters of the device from its spontaneous emission spectrum.

### 1. 서론

Distributed feedback (DFB) 구조소자는 고속 변조시 단일 모드로 동작하며 좁은 발진 선폭을 가지고, 길이 방향의 모드가 안정적이라는 장점을 가지기

때문에 고속 광통신 시스템을 구현하기 위한 핵심 소자이다<sup>[1]</sup>. DFB 구조소자의 중요 파라미터들의 값들을 추정하고 동작 특성을 해석하기 위하여 DFB 구조소자의 자연방출 스펙트럼에 대하여 많은 연구가 행해졌다<sup>[2-4]</sup>.

Soda 와 Imai 는 결합 모드 이론 (Coupled mode theory) 과 다중반사법을 이용하여 DFB 구조소자의 자연방출 스펙트럼을 수치 해석 방법을 사용하여 분석하였다<sup>[2]</sup>. Makino 와 Glinski 는 결합 모드 이론에 transfer matrix 방법과 다중반사법을 사용하여 양 단면 반사를 고려한 DFB 구조소자의 자연방출 스펙트럼에 관한 analytic 식을 얻고 분석하였다<sup>[3]</sup>. 그러나

\* 正會員, 崇實大學校 電子工學科

(Dept. of Elec. Eng., SoongSil Univ.)

\*\* 正會員, 韓國通信 硏究開發院

(Korea Telecon Research Laboratories.)

接受日字: 1994年 10月 31日

Makino와 Glinski 는 회절 격자의 위상,  $\psi$ , 이 0 인 경우에 자연 방출 스펙트럼에 관한 analytic 식을 유도하였다.

본 논문에서는 양 단면의 반사와 회절격자의 위상이 고려된 자연방출 스펙트럼에 관한 analytic 식을 Makino와 Glinski의 방법을 따라 유도하였다. DFB 구조소자의 중요 파라메타들이 자연 방출 스펙트럼 및 동작 특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여, 또한 연구해야될 자연 방출 스펙트럼의 수를 줄이기 위하여 중요 파라메타들과 자연방출 스펙트럼과의 관계를 구하였다. 서로 다른 값의 파라메타들을 가지는 DFB 구조소자의 자연방출 스펙트럼이 Bragg 주파수에 대하여 mirror image 를 가지기 위한 파라메타들간의 관계식을 유도하였고 Bragg 주파수에 대하여 대칭인 자연 방출 스펙트럼을 가지는 DFB 구조소자의 파라메타 값들을 구하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 자연 방출 스펙트럼과 중요 파라메타들간의 관계를 확인하였고 자연 방출 스펙트럼으로부터 중요 파라메타들의 값을 추정할 수 있는 가능성을 확인하였다. DFB 구조소자의 coupling mechanism 이 gain coupling만을 가지는 경우가 index coupling만을 가지는 경우에 비하여 일반적으로 DFB 구조소자의 Side mode suppression ratio ( SMSR )이 향상됨을 확인할 수 있었고 자연방출 스펙트럼이 중요 파라메타 값들의 변화에 영향을 적게 받음을 확인할 수 있었다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 양 단면의 반사와 회절격자의 위상이 고려된 자연방출 스펙트럼에 관한 analytic 식을 결합모드 방정식의 해에 transfer matrix 방법과 다중반사 방법을 사용하여 유도한다. 유도된 자연방출 스펙트럼에 관한 식으로부터 단면 1과 단면 2에로의 자연방출 스펙트럼에 관한 식은 본질적으로 같은 식임을 보인다. 3장에서는 DFB 구조소자의 파라메타들이 자연방출 스펙트럼 및 동작 특성에 미치는 영향을 연구하고 또한 경우의 수를 줄이기 위하여 자연방출 스펙트럼과 파라메타들 간의 관계를 회절격자가 가지는 coupling의 종류에 따라 유도하였다. 4장에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 자연 방출 스펙트럼과 파라메타들간의 관계를 확인하였고 자연방출 스펙트럼으로부터 파라메타 값들을 추정할 수 있는 가능성을 확인하였다. 5장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 자연 방출 스펙트럼에 관한식 유도

그림 1과 같은 기본적인 DFB 구조에서 index coupling 과 gain coupling 이 동시에 존재할 경우

+z 방향과 -z 방향으로 진행하는 파의 복소진폭  $A(z)$  와  $B(z)$  사이의 관계는 다음과 같은 결합모드 방정식으로 나타낼 수 있다.<sup>15)</sup>

$$\begin{cases} \frac{dA}{dz} + (i\delta - \alpha) A(z) = -i(x - ife^{i\theta}) e^{-i\psi} B(z) \\ \frac{dB}{dz} - (i\delta - \alpha) B(z) = i(x - ife^{i\theta}) e^{i\psi} A(z) \end{cases} \quad (1)$$

여기서  $\alpha$  는 평균 net field gain 이고  $\kappa$  는 index coupling 계수,  $f$  는 gain coupling 계수,  $\theta$  는 gain 회절격자의 위상과 index 회절 격자의 위상차,  $\psi$  는  $z=0$  (입력단면) 에서의 index 회절 격자의 위상,  $\delta = \beta - (m\pi/\Lambda) = \beta - \beta_0$  는 Bragg 주파수,  $\beta_0$ , 로부터의 변이이다.  $z=0$  에서의 index 회절격자의 위상을 나타내는  $\psi$  는 그림 2와 같이 정의된다.

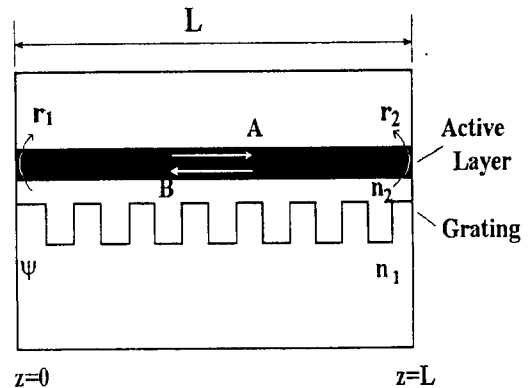


그림 1. DFB 구조소자의 개략도  
Fig. 1. Schematic diagram of a device with DFB structures.

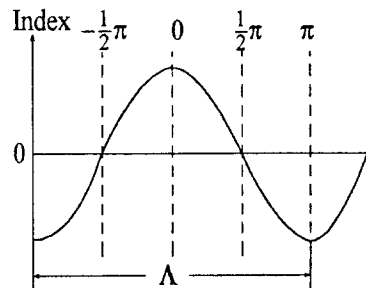


그림 2. 회절 격자의 위상 정의  
Fig. 2. Definition of the phase of a grating.

제작상의 어려움 때문에 대부분의 DFB 구조소자는 gain 회절 격자의 위상과 index 회절격자의 위상차  $\theta$  가 0 이거나 또는  $\pi$ 이다.  $\theta$  가  $\pi$ 일 때는 coupling계수  $x' = x - if$  의 허수항인  $f$  값이  $\theta$  가 0일 때의 값과 크기는 같고 부호만 반대이다. 따라서 본 논문에서

는  $\theta=0$  인 경우만 고려하였고 그 결과는  $\theta=\pi$  인 경우에 그대로 적용될 수 있다.

이 때 위상을 고려한  $+z$  방향으로 진행하는 전계  $E_A(z)$ 와 복소진폭  $A(z)$ ,  $-z$ 방향으로 진행하는 전계  $E_B(z)$ 와 복소진폭  $B(z)$  사이의 관계는 각각 다음과 같이 표현된다.

$$E_A(z) = A(z)\exp(-i\beta_0 z) \text{ 와 } E_B(z) = B(z)\exp(i\beta_0 z) \quad (2)$$

식 (1) 으로 주어진 결합모드 방정식의 해로부터 DFB 구조의 임의의 두 위치  $z=z$  와  $z=z_a$  에서의 전계  $E_A(z)$ ,  $E_A(z_a)$  와  $E_B(z)$ ,  $E_B(z_a)$  의 관계는 다음과 같은 transfer matrix 로 표시된다.

$$\begin{bmatrix} E_A(z) \\ E_B(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11}(z-z_a) & F_{12}(z-z_a) \\ F_{21}(z-z_a) & F_{22}(z-z_a) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_A(z_a) \\ E_B(z_a) \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서

$$F_{11}(z-z_a) = \{ \cosh [ S(z-z_a) ] - i\delta' \sinh [ S(z-z_a) ] / S \} \exp [ -i\beta_0(z-z_a) ] ,$$

$$F_{12}(z-z_a) = \{ -ix' \sinh [ S(z-z_a) ] \exp(-i\psi) / S \} \exp [ -i\beta_0(z+z_a) ] ,$$

$$F_{21}(z-z_a) = \{ ix' \sinh [ S(z-z_a) ] \exp(i\psi) / S \} \exp [ i\beta_0(z+z_a) ]$$

$$F_{22}(z-z_a) = \{ \cosh [ (S(z-z_a) + i\delta' \sinh [ S(z-z_a) ] / S) ] \exp [ i\beta_0(z-z_a) ] , \quad (4)$$

여기서  $S^2 = x'^2 - \delta'^2$  ,  $x' = x - i\psi$  이고  $\delta' = \delta + ix$  이다.

그림 1 의 기본적인 DFB 구조의 단면 i(i = 1, 2) 에서의 단위 주파수 대역폭당 자연방출 스펙트럼  $p_{Ni}$  는 다중 반사방법을 사용하면 다음과 같이 표현된다<sup>[4]</sup>.

$$p_{Ni} = (1-|r_i|^2) \int_0^L hf n_{sp} 2g F_i(z) dz \quad (5)$$

여기서

$$F_i(z) = \frac{|t^+(z)|^2 + |t^-(z)r^+(z)|^2}{|1 - r^-(z)r^+(z)|^2}$$

이고

$$F_1(z) = \frac{|t^-(z)|^2 + |t^-(z)r^+(z)|^2}{|1 - r^-(z)r^+(z)|^2} \quad (6)$$

이며  $hf$  는 광자의 energy,  $n_{sp}$  는 stimulated emission 에 대한 spontaneous emission 의 비,  $2g = 2\alpha + \alpha_{ab}$  로서 주어지는 power gain 계수,  $\alpha_{ab}$  는 DFB 구조에서 발생하는 손실계수이며,  $r^+(z)$  와  $r^-(z)$  는 각각  $z$  에서  $z=L$ ,  $z=0$  쪽으로의 반사계수 이고  $t^+(z)$  와  $t^-(z)$  는 각각  $z$  에서  $z=L$ ,  $z=0$  쪽으로의 투과계수이다.

식 (4)와 (6)을 식 (5) 에 대입하고 정리하면  $p_{Ni}$  는 다음과 같이 표현된다.

$$p_{Ni} = hf n_{sp} G \chi_i \quad (7)$$

여기서  $G$  는 투과 증폭율로서 다음과 같이 표현된다.

$$G = (1-|r_1|^2)(1-|r_2|^2)/|D|^2 \quad (8)$$

이고

$$D = F_{22}(L) + r_1 F_{21}(L) - r_2 F_{12}(L) - r_1 r_2 F_{11}(L) \quad (9)$$

또한  $\chi_i$  는 DFB 구조를 가진 소자의 문턱전류에서 단면  $j$  ( $j \neq i$ )의 미분 양자 효율  $\eta_j$  의 역수라는 물리적 의미를 가진다. 투과 증폭율  $G$  와  $\chi_i$  를 DFB 구조 소자의 파라메타들로 나타내면 다음과 같다.

$$G = \frac{|S^2(1 - \hat{r}_1^2)(1 - \hat{r}_2^2)|}{| [ S \cosh(SL) - (\delta' - ix' \hat{r}_1) \sinh(SL) ] - \hat{r}_2 [ S \hat{r}_1 \cosh(SL) + (\delta' \hat{r}_1 - ix' \hat{r}_1) \sinh(SL) ] |^2} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \chi_i = & \frac{g(\exp(2S_i L) - 1)}{4|S_i^2 S_i (1 - |\hat{r}_j|^2)} \\ & \{ |(S - \delta') + i \hat{r}_j x'|^2 + |-ix' + \hat{r}_j (S + \delta')|^2 \} \\ & + \frac{g(1 - \exp(-2S_i L))}{4|S_i^2 S_i (1 - |\hat{r}_j|^2)} \\ & \{ |(S + \delta') - i \hat{r}_j x'|^2 + |-ix' - \hat{r}_j (S - \delta')|^2 \} \\ & + \frac{2g}{4|S_i^2 S_i (1 - |\hat{r}_j|^2)} \text{Im} [ \{ (S + \delta')^* (S - \delta') - |i \hat{r}_j x'|^2 \\ & + |\hat{r}_j|^2 (S + \delta') (S - \delta')^* - |-ix'|^2 \\ & - \hat{r}_j^* \{ (ix')^* (s - \delta') - (-ix') (s - \delta')^* \} \\ & + \hat{r}_j \{ (ix') (s + \delta')^* - (-ix')^* (s + \delta') \} \} \{ \exp(2S_i L) - 1 \} \end{aligned} \quad (11)$$

여기서

$$S_r = \text{Re}(S), S_i = \text{Im}(S), \delta' = i\delta = g - i\delta, \hat{r}_1 = r_1 \exp(i\psi) \text{ 이고 } \hat{r}_2 = r_2 \exp\{-i(2\beta_0 L + \psi)\}$$

$p_{N2}$  와  $p_{N1}$ 은 투과 증폭을  $G$ 를 공통의 파라메타로서 포함하고 있다. 또한 식 (11)에서 보면  $x_2$ 에는  $\hat{r}_1$ 을,  $x_1$ 에는  $\hat{r}_2$ 를 사용하여야 한다는 것을 제외하고는  $x_2$ 와  $x_1$ 은 같은 형태의 식임을 알 수 있다. 따라서 단면 2에로의 자연 방출 스펙트럼  $p_{N2}$ 의 결과는 그대로 단면 1에로의 자연 방출 스펙트럼  $p_{N1}$ 에 적용할 수 있음을 알 수 있다. 그러므로 자연 방출 스펙트럼의 해석 및 결과는 단면 2에로의 자연 방출 스펙트럼  $p_{N2}$ 에 대해서만 수행하였다.

### III. 자연 방출 스펙트럼과 파라메타들과의 관계

중요 파라메타인  $r_1, r_2, \phi, L$  및  $x'$ 이 자연 방출 스펙트럼에 미치는 영향을 알아보기 위하여 중요 파라메타들의 모든 값에 대하여 자연방출 스펙트럼을 계산하는 것은 불가능한 일이다. 따라서 중요 파라메타들이 자연 방출 스펙트럼 및 동작 특성에 미치는 영향에 대하여 연구하고 또한 경우의 수를 줄이기 위하여 파라메타들과 자연 방출 스펙트럼과의 관계를 구하였다. 즉 파라메타들 사이에 어떠한 관계가 있을 때 서로 다른 값의 파라메타들을 가지는 DFB 구조소자의 자연 방출 스펙트럼이  $\delta = 0$ 에 대하여 mirror image를 갖는가에 대하여 알아보았다. 또한  $\delta = 0$ 에 대하여 대칭인 자연 방출 스펙트럼을 가지는 DFB 구조소자의 파라메타 값들은 무엇인가에 대하여 알아보았다.

DFB 구조소자의 자연방출 스펙트럼은 식 (7)에서 보는 바와 같이 투과이득 스펙트럼을 나타내는  $G$ 와  $x_2$ 의 곱으로 주어진다.  $x_2$ 가 stop band내에서는 파장에 따라 크게 변화하기 때문에 자연 방출 스펙트럼과 투과 이득 스펙트럼은 stop band 내에서 큰 차이를 보인다. 그러므로 파라메타들이 자연 방출 스펙트럼에 미치는 영향을 알아보기 위하여는 파라메타들이 투과 이득 스펙트럼  $G$ 와  $x_2$ 에 미치는 영향을 동시에 알아보아야 한다.

#### 1. Index coupling 과 gain coupling이 동시에 존재하는 경우

Index coupling 과 gain coupling이 동시에 존재하는 경우 결합 계수는  $x' = x - iy$ 이다. 식 (10)으로 표현되는 투과이득 스펙트럼  $G$ 는 단면 1에서의 반사계수  $\hat{r}_1$ 과 단면 2에서의 반사계수  $\hat{r}_2$ 가 서로 교환되어도 ( $\hat{r}_1 \leftrightarrow \hat{r}_2$ ) 같은 스펙트럼을 가짐을 알 수 있다.

$$G(\delta, x', \hat{r}_1, \hat{r}_2) = G(\delta, x', \hat{r}_2, \hat{r}_1) \quad (12)$$

$x' \rightarrow x^*$  - index coupling 과 gain coupling이 동시에 존재하는 경우 index coupling의 값은 같으나 gain coupling의 값은 절대값이 같고 부호가 반대인 서로 다른 두 경우 - 인 경우  $\delta \rightarrow -\delta$  이면  $\delta'' \rightarrow \delta''^*$  이므로  $S \rightarrow S^*$ 이다. 따라서  $\hat{r}_1 \rightarrow -\hat{r}_1^*$  이고  $\hat{r}_2 \rightarrow -\hat{r}_2^*$  이면 투과 이득 스펙트럼  $G$ 는 다음과 같은 관계를 가진다.

$$G(\delta, x', \hat{r}_1, \hat{r}_2) = G(-\delta, x'', -\hat{r}_1^*, -\hat{r}_2^*) \quad (13)$$

$x'L$ 의 coupling 세기를 가지며 단면 반사가 각각  $\hat{r}_1$ 과  $\hat{r}_2$ 를 가지는 DFB 구조 소자의 투과 이득 스펙트럼과  $x'L$ 의 coupling 세기를 가지며 단면 반사가 각각  $-\hat{r}_1^*$ 와  $-\hat{r}_2^*$ 를 가지는 DFB 구조 소자의 투과 이득 스펙트럼은  $\delta = 0$ 에 대하여 mirror image의 관계를 가짐을 알 수 있다.

식 (11)로 표시되는  $x_i$ 와 파라메타들간의 관계도 투과 이득 스펙트럼  $G$ 와 파라메타들간의 관계와 비슷한 관계식이 성립된다.

$$x_i(\delta, x', \hat{r}_j) = x_i(-\delta, x'', -\hat{r}_j^*) \quad (14)$$

따라서  $G$ 와  $x_i$ 로 표시되는 자연방출 스펙트럼  $p_{N1}$ 와 파라메타들간의 관계는 다음과 같이 표시된다.

$$p_{N1}(\delta, x', \hat{r}_1, \hat{r}_2) = p_{N1}(-\delta, x'', -\hat{r}_1^*, -\hat{r}_2^*) \quad (15)$$

$x'L$ 의 coupling 세기를 가지며 단면 반사가 각각  $\hat{r}_1$ 과  $\hat{r}_2$ 를 가지는 DFB 구조 소자의 자연 방출 스펙트럼과  $x'L$ 의 coupling 세기를 가지며 단면 반사가 각각  $-\hat{r}_1^*$ 와  $-\hat{r}_2^*$ 를 가지는 DFB 구조 소자의 자연 방출 스펙트럼은  $\delta = 0$ 에 대하여 mirror image의 관계를 가짐을 알 수 있다.

#### 2. Index coupling만을 가지는 경우

index coupling 만이 존재하는 경우는  $x' = x$ 이다. 이 경우에도  $\hat{r}_1 \leftrightarrow \hat{r}_2$  일 때 투과 이득 스펙트럼은 식 (12)와 같은 관계를 가진다.

$\delta \rightarrow -\delta$  이면  $\delta'' \rightarrow \delta''^*$ 이고 따라서  $S \rightarrow S^*$ 이다. 그러므로 투과 이득 스펙트럼  $G$ 는 식 (10)으로 부터 다음과 같은 관계식을 가짐을 알 수 있다.

$$G(\delta, x, \hat{r}_1, \hat{r}_2) = G(-\delta, x, -\hat{r}_1^*, -\hat{r}_2^*) \quad (16)$$

또한 식 (11)로 부터  $x_i$ 도 다음과 같은 관계식을 가짐을 알 수 있다.

$$x_i(\delta, x, \hat{r}_j) = x_i(-\delta, x, -\hat{r}_j^*) \quad (17)$$

따라서 G와  $x_i$  의 곱으로 표시되는 자연방출 스펙트럼과 파라메타들간의 관계는 다음과 같이 표시된다.

$$p_M(\delta, x, \hat{r}_1, \hat{r}_2) = p_M(-\delta, x, -\hat{r}_1^*, -\hat{r}_2^*) \quad (18)$$

coupling 세기가  $xL$ 로 같은 DFB 구조 소자의 단면 반사가 각각  $\hat{r}_1$ 과  $\hat{r}_2$  일 때의 자연 방출 스펙트럼은 단면 반사가 각각  $-\hat{r}_1^*$  이고  $-\hat{r}_2^*$ 일 때의 자연 방출 스펙트럼과  $\delta=0$  에 대하여 mirror image 의 관계를 가짐을 알 수 있다. 특히 식 (18)로 부터  $\hat{r}_1 = -\hat{r}_1^*$ 이고  $\hat{r}_2 = -\hat{r}_2^*$  의 관계를 만족하는 DFB 구조 소자의 자연 방출 스펙트럼은  $\delta=0$  에 대하여 대칭임을 알 수 있다. 즉 회절 격자의 초기 위상  $\psi$  가  $(m+1/2)\pi$  이고 소자의 위상 길이  $2\beta_0L$  이  $2n\pi - \hat{r}_1$ 의 위상이  $(m+1/2)\pi$  이고  $\hat{r}_2$ 의 위상이  $(m+1/2)\pi -$ 인 DFB 구조 소자의 자연 방출 스펙트럼은  $\delta=0$  에 대하여 대칭임을 알 수 있다.

- 표 1. Index coupling 만을 가지는 경우에 자연방출 스펙트럼이  $\delta=0$  에 관한 mirror image 를 가지는  $\hat{r}_1$  과  $\hat{r}_2$ 의 위상

Table 1. The phases of  $\hat{r}_1$  and  $\hat{r}_2$  for the spontaneous emission spectrum to have the mirror image with respect to  $\delta=0$  in the case of pure index coupling.

위 상		$\delta=0$ 에 관한 mirror image를 가지는 위상	
$\hat{r}_1$	$\hat{r}_2$	$-\hat{r}_1^*$	$-\hat{r}_2^*$
$-\pi/2$	$-\pi/2$	$-\pi/2$	$-\pi/2$
$-\pi/2$	0	$-\pi/2$	$\pi$
$-\pi/2$	$\pi/2$	$-\pi/2$	$\pi/2$
0	$-\pi/2$	$\pi$	$-\pi/2$
0	0	$\pi$	$\pi$
0	$\pi/2$	$\pi$	$\pi/2$
0	$\pi$	$\pi$	0
$\pi/2$	$-\pi/2$	$\pi/2$	$-\pi/2$
$\pi/2$	0	$\pi/2$	$\pi$
$\pi/2$	$\pi/2$	$\pi/2$	$\pi/2$

$\hat{r}_1$ 과  $\hat{r}_2$ 의 모든 위상값이 자연방출 스펙트럼에 미치는 영향에 대하여 연구하는 것은 거의 불가능한 일이다. 따라서  $\hat{r}_1$ 과  $\hat{r}_2$ 의 위상을 각각  $\pi/2$ 만큼 변화시키며 자연방출 스펙트럼에 미치는 영향을 고찰하였고

그 결과를 표 1에 보였다.  $\delta=0$ 에 대한 mirror image 가 존재하기 때문에 경우의 수가 16가지에서 10가지로 줄게 되며 그중 4가지 경우는  $\delta=0$ 에 대하여 대칭인 스펙트럼이 존재하게 된다. 또한  $r_1 = r_2$  인 경우  $\hat{r}_1$ 과  $\hat{r}_2$ 의 위상이 서로 바뀐 3가지 쌍의 경우는 각 쌍의 자연 방출 스펙트럼을 구성하는 성분 중 투과 이득 스펙트럼은 같으나  $x_2$ 가 다른 경우이다.

3. gain coupling 만을 가지는 경우

Gain coupling만이 존재하는 경우는  $x' = -ij\alpha$ 이다. 이 경우에도  $\hat{r}_1 \leftrightarrow \hat{r}_2$  일때 투과 이득 스펙트럼 G 는 식 (12)와 같은 관계를 가진다.

$\delta \rightarrow -\delta$  이면  $\delta' \rightarrow \delta''$ 이고 따라서  $S \rightarrow S^*$ 이다. 그러므로 투과 이득 스펙트럼 G는 식 (10)으로 부터 다음과 같은 관계식을 가짐을 알 수 있다.

$$G(\delta, -ij, \hat{r}_1, \hat{r}_2) = G(-\delta, -ij, \hat{r}_1^*, \hat{r}_2^*) \quad (19)$$

또한 식 (11)로 부터  $x_i$ 도 다음과 같은 관계식을 가짐을 알 수 있다.

$$x_i(\delta, -ij, \hat{r}_i) = x_i(-\delta, -ij, \hat{r}_i^*) \quad (20)$$

따라서 G와  $x_i$ 의 곱으로 표시되는 자연방출 스펙트럼과 파라메타들간의 관계는 다음과 같이 표시된다.

$$p_M(\delta, -ij, \hat{r}_1, \hat{r}_2) = p_M(-\delta, -ij, \hat{r}_1^*, \hat{r}_2^*) \quad (21)$$

coupling 세기가  $\pi$ 로 같은 DFB 구조 소자의 단면 반사가 각각  $\hat{r}_1$ 과  $\hat{r}_2$  일 때의 자연 방출 스펙트럼은 단면 반사가 각각  $\hat{r}_1^*$  이고  $\hat{r}_2^*$ 일 때의 자연 방출 스펙트럼과  $\delta=0$ 에 대하여 mirror image 의 관계를 가짐을 알 수 있다. 특히 식 (21)로 부터  $\hat{r}_1 = \hat{r}_1^*$  이고  $\hat{r}_2 = \hat{r}_2^*$ 의 관계를 만족하는 DFB 구조 소자의 자연 방출 스펙트럼은  $\delta=0$ 에 대하여 대칭임을 알 수 있다. 즉 회절 격자의 초기 위상  $\psi$  가  $m\pi$  이고 소자의 위상 길이  $2\beta_0L$  이  $2n\pi - \hat{r}_1$ 의 위상이  $m\pi$  이고  $\hat{r}_2$ 의 위상이  $m\pi -$ 인 DFB 구조 소자의 자연 방출 스펙트럼은  $\delta=0$ 에 대하여 대칭임을 알 수 있다.

Index coupling 만을 가지는 경우와 마찬가지로  $\hat{r}_1$ 과  $\hat{r}_2$ 의 위상을 각각  $\pi/2$ 만큼 변화시키며 자연방출 스펙트럼에 미치는 영향을 고찰하였고 그 결과를 표 2에 보였다. Index coupling만을 가지는 경우와 마찬가지로  $\delta=0$ 에 대해 mirror image가 존재하기 때문에 경우의 수가 16가지에서 10가지로 줄게 되며 그중 4가지 경우는  $\delta=0$ 에 대하여 대칭인 스펙트럼이 존재

하게 된다. 또한  $r_1 = r_2$  인 경우  $\hat{r}_1$ 과  $\hat{r}_2$ 의 위상이 서로 바뀐 3가지 쌍의 경우는 각 쌍의 자연 방출 스펙트럼을 구성하는 성분 중 투과 이득 스펙트럼은 같으나  $x_2$ 가 다른 경우이다.

표 2. Gain coupling 만을 가지는 경우에 자연 방출 스펙트럼이  $\delta=0$  에 관한 mirror image 를 가지는  $\hat{r}_1$ 과  $\hat{r}_2$ 의 위상

Table 2. The phases of  $\hat{r}_1$  and  $\hat{r}_2$  for the spontaneous emission spectrum to have the mirror image with respect to  $\delta=0$  in the case of pure gain coupling.

위 상		$\delta=0$ 에 관한 mirror image를 가지는 위상	
$\hat{r}_1$	$\hat{r}_2$	$\hat{r}_1^*$	$\hat{r}_2^*$
$-\pi/2$	$-\pi/2$	$\pi/2$	$\pi/2$
$-\pi/2$	0	$\pi/2$	0
$-\pi/2$	$\pi/2$	$\pi/2$	$-\pi/2$
$-\pi/2$	$\pi$	$\pi/2$	$\pi$
0	$-\pi/2$	0	$\pi/2$
0	0	0	0
0	$\pi$	0	$\pi$
$\pi$	$-\pi/2$	$\pi$	$\pi/2$
$\pi$	0	$\pi$	0
$\pi$	$\pi$	$\pi$	$\pi$

#### IV. 결과 및 토의

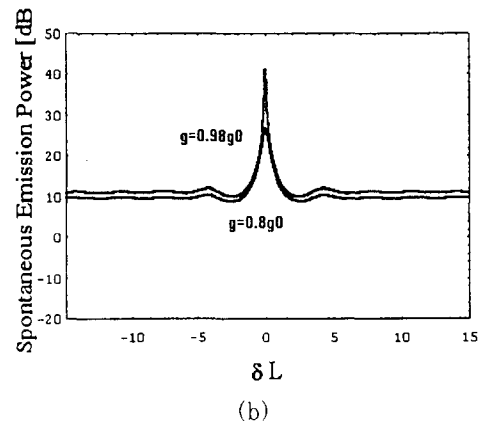
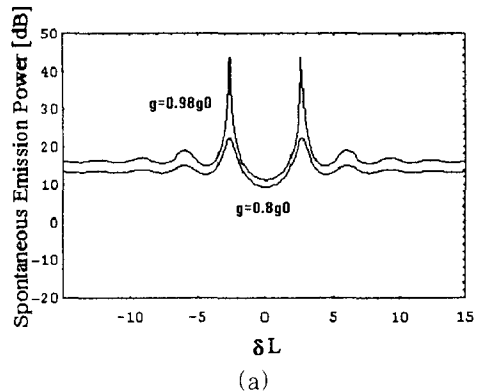
DFB 구조를 가진 소자의 자연 방출 스펙트럼으로부터 기본 파라미터들을 추정할 수 있는 가능성을 확인하기 위하여 또한 앞 절에서 유도한 자연방출 스펙트럼과 파라미터들간의 관계를 확인하기 위하여 기본 파라미터들의 값들을 변화시켜가며 자연 방출 스펙트럼의 변화를 알아보았다. 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하기 위하여 사용한 파라메타 값은 다음과 같다. Coupling의 세기  $|x'L|=1$ , 로 소자 내에서 발생하는 흡수 및 산란 손실  $aL=1$ 로 설정하였다. DFB 구조소자의 단면 반사 계수의 크기  $r$ 의 모든 값에 대하여 고찰하는 것은 불가능한 일이다. 따라서 DFB 구조 소자의 단면이 절개면 또는 무반사 코팅층을 가지는 경우에 대해서만 고찰하였고 절개면을 가지는 경우 *InGaAsP*와 공기의 굴절율의 비는  $\lambda=1.55\mu\text{m}$ 에서 약 3.2 이므로  $r$ 을 0.524로 설정하였다. 또한 net field gain의 변화에 따른 자연 방출 스펙트럼의 변화를 알아보기 위하여 gain 계수  $g$ 는 문턱 gain 계수  $g_{th}$ 의 0.98인

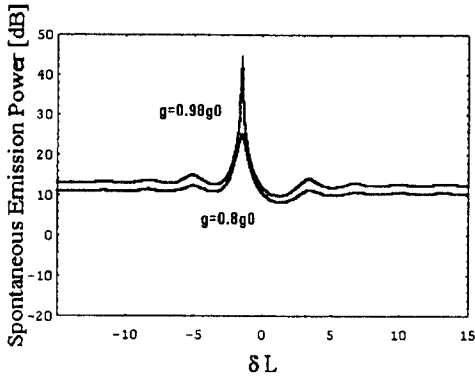
값과 0.8인 값에서 각각 자연 방출 스펙트럼을 구하였다.

##### 1. 양 단면 모두 무반사 코팅을 가진 경우

Index coupling과 gain coupling이 동시에 존재하는 경우 식 (15)로 부터 자연방출 스펙트럼은  $p_M(\delta, x') = p_M(-\delta, x'')$  라는 관계식이 성립함을 알 수 있다. 따라서 자연방출 스펙트럼은  $\delta=0$ 에 대하여 대칭이 아니다. Index coupling만이 존재하는 경우와 gain coupling만이 존재하는 경우는 각각  $p_M(\delta, x) = p_M(-\delta, x)$  와  $p_M(\delta, -i) = p_M(-\delta, -i)$  라는 관계식이 성립한다. 즉 자연방출 스펙트럼이  $\delta=0$ 에 대하여 대칭이다. 그림3 (a), (b) 와 (c)는 각각 index coupling 만을 가진 경우, gain coupling 만을 가진 경우와 index coupling 과 gain coupling 을 같은 크기로 가진 경우에 대한 자연 방출 스펙트럼이다.

그림 3(a)는 index coupling 만을 가지는 경우의 자연방출 스펙트럼으로서 예상한대로 자연 방출 파워의 최대치는 stop band의 양쪽 끝에서 발생하며 자연 방출 스펙트럼은 Bragg 파장( $\delta L=0$ )에 대하여 대칭임을 볼 수 있다.





(c)

그림 3. 양 단면 모두 무반사 코팅을 가진 경우에 회절격자의 coupling의 특성에 따른 DFB 구조 소자의 자연방출 스펙트럼. (a) Index coupling 만을 가지는 경우, (b) Gain coupling 만을 가지는 경우, (c) Index coupling 과 gain coupling 을 같은 크기로 가지는 경우

Fig. 3. Spontaneous emission spectra of a device using DFB structures with antireflection coatings on both facets for various coupling mechanisms of a grating. (a) The case of pure index coupling, (b) The case of pure gain coupling, (c) The case of the same magnitude of index coupling and gain coupling.

또한 증폭율이 커짐에 따라 방출 파워가 커짐을 볼 수 있다. 그림 3(b)는 gain coupling 만을 가지는 경우의 자연 방출 스펙트럼으로서 예상대로 자연 방출 파워의 최대치는 Bragg 파장에서 발생함을 볼 수 있으며 또한 자연 방출 스펙트럼은 Bragg 파장에 대하여 대칭이다. 그림 3(c)는 index coupling 의 크기와 gain coupling 의 크기가 같은 경우의 자연 방출 스펙트럼이다. 자연방출 파워의 최대치는 Bragg 파장과 stop band 의 끝의 중간에 해당하는  $\delta L = -2.7$  에서 발생하며 또한 자연방출 스펙트럼의 대칭성이 깨져 있음을 볼 수 있다.

세 그림을 비교하면 gain coupling 이 증가할수록 발진 모드의 위치가 stop band 의 끝에서 Bragg 파장 쪽으로 이동함을 볼 수 있다. 따라서 자연방출 스펙트럼으로부터 gain coupling 의 정도를 추정할 수 있다고 생각된다.

2. 한 단면은 무반사 코팅을 가지고 다른 단면은 절개면을 가지는 경우

Index coupling만을 가지는 경우에  $\hat{\gamma}_1$ 의 위상을

$\pi/2$ 만큼 변화시키면서 컴퓨터 시뮬레이션을 한 결과를 그림 4에 보였다. 표 1로부터 알 수 있듯이 그림 4 (a)는  $\hat{\gamma}_1$ 의 위상이  $-\pi/2$ 인 경우로서 단면 2에로의 자연 방출 스펙트럼  $p_{N2}$ 가  $\delta = 0$ 에 대하여 대칭임을 볼 수 있고 stop band의 양쪽 끝에서 방출 power가 최대로 되는 모드가 발생하여 모드 degeneracy가 발생함을 볼 수 있다. 또한 그림 4 (b)와 4 (d)는  $\hat{\gamma}_1$ 의 위상이 각각 0과  $\pi$ 인 경우로서 두 경우의 자연 방출 스펙트럼은  $\delta = 0$ 에 대하여 mirror image임을 볼 수 있고 또한 모드 degeneracy가 발생하지 않음을 볼 수 있다. 그림 4 (c)는  $\hat{\gamma}_1$ 의 위상이  $\pi/2$ 인 경우로서 자연 방출 스펙트럼이  $\delta = 0$ 에 대하여 대칭임을 볼 수 있고 방출 파워가 최대로 되는 모드가  $\delta = 0$ 에서 발생함을 볼 수 있다. Gain coupling만을 가지는 경우에  $\hat{\gamma}_1$ 의 위상을  $\pi/2$ 만큼 변화시키면서 컴퓨터 시뮬레이션을 한 결과를 그림 5에 보였다. 표 2로부터 알 수 있듯이 그림 5 (a)와 5 (c)는  $\hat{\gamma}_1$ 의 위상이 각각  $-\pi/2$ 와  $\pi/2$ 인 경우로서 두 경우의 자연 방출 스펙트럼은  $\delta = 0$ 에 대하여 mirror image임을 볼 수 있고 그림 4의 index coupling의 결과에 비해 SMSR이 매우 향상되어 있음을 알 수 있다. 또한 그림 5 (b)는  $\hat{\gamma}_1$ 의 위상이  $\pi$ 인 경우로서 자연 방출 스펙트럼이  $\delta = 0$ 에 대하여 대칭임을 볼 수 있으며 방출 파워가 최대로 되는 파장이  $\delta = 0$ 임을 볼 수 있고, index coupling에 비해 SMSR이 매우 향상되어 있음을 알 수 있다. 그림 5 (d)는  $\hat{\gamma}_1$ 의 위상이 0인 경우로서 자연 방출 스펙트럼이  $\delta = 0$ 에 대하여 대칭임을 볼 수 있으며 또한 모드 degeneracy가 발생함을 볼 수 있다.

3. 양 단면 모두 절개면을 가지는 경우

Index coupling만을 가지는 경우에 단면 2에로의 자연 방출 스펙트럼을 각각  $\hat{\gamma}_1$ 과  $\hat{\gamma}_2$ 의 위상을  $\pi/2$ 만큼 변화시키면서 컴퓨터 시뮬레이션을 행하였다. 그 결과 앞에서 말한 바와 같은 파라미터들간의 관계들이 성립할 때  $\delta = 0$ 에 대하여 mirror image가 존재하기 때문에 표 1에서 보는 바와 같이 경우의 수가 16가지에서 10가지로 됨을 확인하였다.

또한 10가지 경우 중 4가지 경우는  $\delta = 0$ 에 대하여 대칭인 스펙트럼이 존재하며  $\hat{\gamma}_1$ 과  $\hat{\gamma}_2$ 의 위상이 서로 바뀐 3쌍의 경우는 각 쌍의 자연 방출 스펙트럼을 구성하는 성분 중 두과 이득 스펙트럼은 같으나  $x_2$ 가 다르기 때문에 약간 다른 스펙트럼을 보임을 확인하였다.

16 가지 경우 중 대표적인 5 가지 경우의 자연 방출

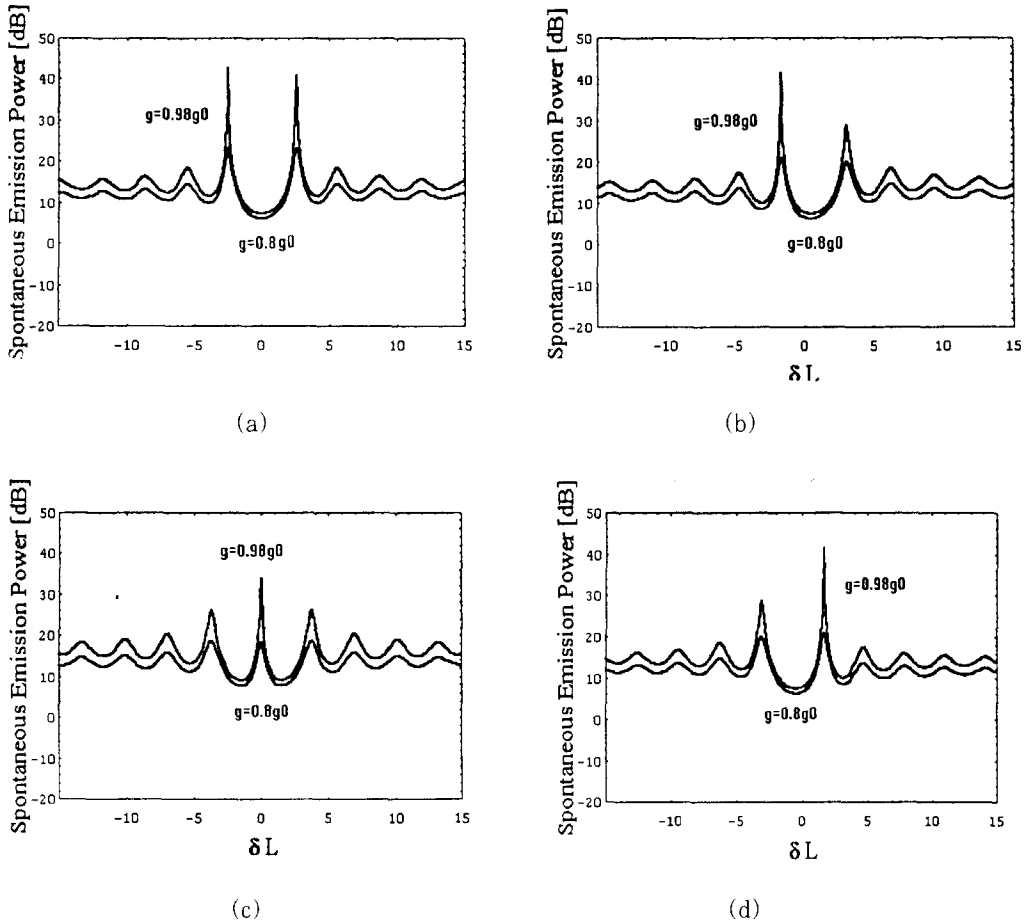


그림 4. 단면반사가  $|\hat{r}_1| = 0.524$  이고  $|\hat{r}_2| = 0$  인 경우 회절격자가 index coupling만을 가진 경우에 여러가지  $\hat{r}_1$ 의 위상값에 대한 DFB 구조소자의 자연방출 스펙트럼

(a)  $\hat{r}_1$ 의 위상 =  $-\pi/2$ , (b)  $\hat{r}_1$ 의 위상 = 0, (c)  $\hat{r}_1$ 의 위상 =  $\pi/2$ , (d)  $\hat{r}_1$ 의 위상 =  $\pi$

Fig. 4. Spontaneous emission spectra of a device using DFB structures with facet reflections  $|\hat{r}_1| = 0.524$  and  $|\hat{r}_2| = 0$  for various phases of  $\hat{r}_1$  in the case of pure index coupling.

(a) The phase of  $\hat{r}_1 = -\pi/2$ , (b) The phase of  $\hat{r}_1 = 0$ , (c) The phase of  $\hat{r}_1 = \pi/2$ .

(d) The phase of  $\hat{r}_1 = \pi$ .

스펙트럼을 그림 6에 보였다. 그림 6 (a)는  $\hat{r}_1$ 과  $\hat{r}_2$ 의 위상이 모두  $-\pi/2$ 인 경우로서 자연 방출 스펙트럼이  $\delta = 0$ 에 대하여 대칭임을 볼 수 있었고 자연 방출 파워가 최대가 되는 모드가 stop band의 양 쪽 끝에서 발생하여 mode degeneracy가 존재함을 볼 수 있다. 또한 gain이 커질수록 자연 방출 파워가 커짐을 볼 수 있었다. 그림 6 (b)는  $\hat{r}_1$ 과  $\hat{r}_2$ 의 위상이 모두 0이고 그림 6 (c)는  $\hat{r}_1$ 과  $\hat{r}_2$ 의 위상이 모두  $\pi$ 인 경우이다. 그림 6 (b)와 그림 6 (c)를 비교하면 자연 방출 스펙

트럼이  $\delta = 0$ 에 대하여 mirror image이고 mode degeneracy가 발생하지 않음을 볼 수 있다. 그림 6 (d)는  $\hat{r}_1$ 과  $\hat{r}_2$ 의 위상이 각각 0이고  $\pi/2$ 인 경우이며

그림 6 (e)는  $\hat{r}_1$ 과  $\hat{r}_2$ 의 위상이 각각  $\pi/2$ 와 0인 경우이다. 이 두 경우는 투과 이득 스펙트럼은 같고  $x_2$ 가 다른 경우로서 자연 방출 스펙트럼이 stop band내에서 달라짐을 볼 수 있다.

Gain coupling만을 가지는 경우에 단면 2에로의 자연 방출 스펙트럼을 각각  $\hat{r}_1$ 과  $\hat{r}_2$ 의 위상을  $\pi/2$ 만큼



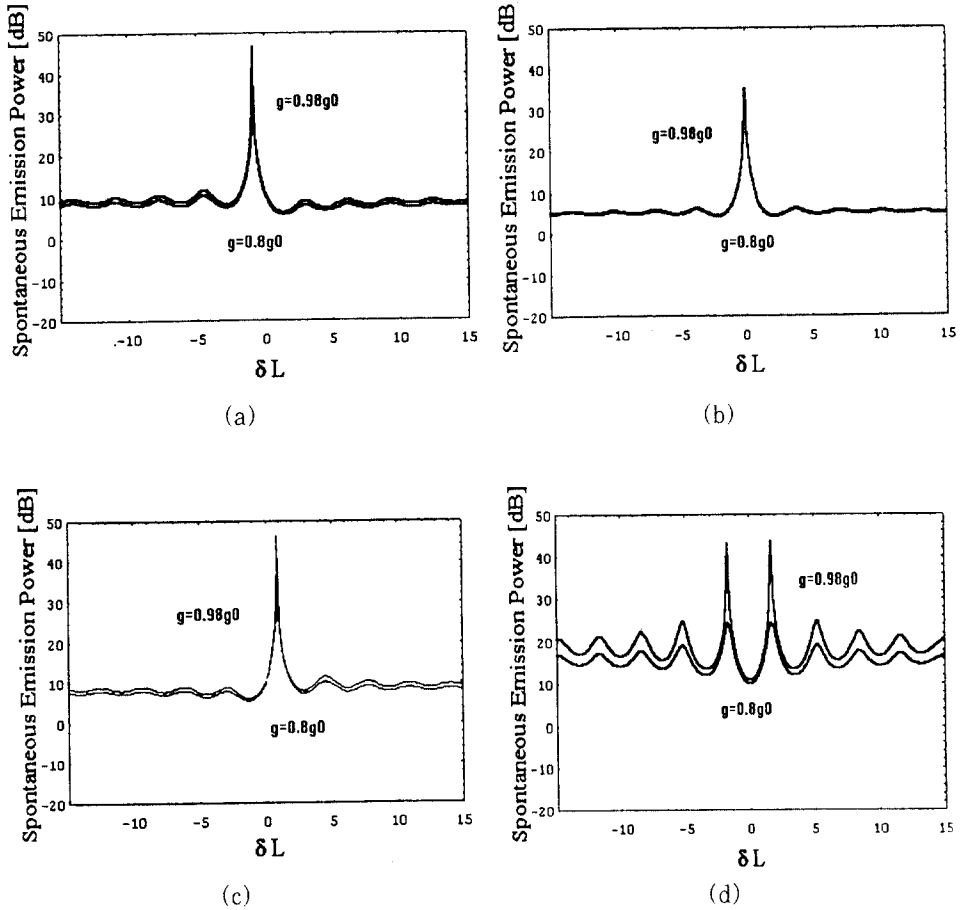


그림 5. 단면반사가  $|\hat{r}_1| = 0.524$  이고  $|\hat{r}_2| = 0$  인 경우 회절격자가 gain coupling만을 가진 경우에 여러가지  $\hat{r}_1$  의 위상값에 대한 DFB 구조소자의 자연방출 스펙트럼

(a)  $\hat{r}_1$  의 위상 =  $-\pi/2$ , (b)  $\hat{r}_1$  의 위상 = 0, (c)  $\hat{r}_1$  의 위상 =  $\pi/2$ , (d)  $\hat{r}_1$  의 위상 =  $\pi$

Fig. 5. Spontaneous emission spectra of a device using DFB structures with facet reflections  $|\hat{r}_1| = 0.524$  and  $|\hat{r}_2| = 0$  for various phases of  $\hat{r}_1$  in the case of pure gain coupling.

(a) The phase of  $\hat{r}_1 = -\pi/2$ , (b) The phase of  $\hat{r}_1 = 0$ , (c) The phase of  $\hat{r}_1 = \pi/2$ ,

(d) The phase of  $\hat{r}_1 = \pi$ .

변화시키면서 컴퓨터 시뮬레이션을 행하였다. 그 결과 앞에서 말한 바와 같은 파라메타들간의 관계들이 성립할 때  $\delta = 0$ 에 대하여 mirror image 가 존재하기 때문에 표 2 에서 보는 바와 같이 경우의 수가 16가지에서 10가지로 됨을 확인하였다. 또한 10가지 경우 중 4가지 경우는  $\delta = 0$ 에 대하여 대칭인 스펙트럼이 존재하며  $\hat{r}_1$ 과  $\hat{r}_2$ 의 위상이 서로 바뀐 3쌍의 경우는 각 쌍의 자연 방출 스펙트럼을 구성하는 성분 중 투과 이득 스펙트럼은 같으나  $x_2$ 가 다르기 때문에 약간 다른 스펙트럼을 보임을 확인하였다.

16 가지 경우 중 대표적인 5 가지 경우의 자연 방출 스펙트럼을 그림 7에 보였다. 그림 7 (a)는  $\hat{r}_1$ 과  $\hat{r}_2$  위상이 모두 0 인 경우로서 자연 방출 스펙트럼이  $\delta = 0$ 에 대하여 대칭임을 볼 수 있었고 자연 방출 파워가 최대로 되는 파장이  $\delta = 0$ 임을 볼 수 있었다. 그림 7 (b)는  $\hat{r}_1$ 과  $\hat{r}_2$ 의 위상이 각각  $-\pi/2$ 이고  $\pi$ 인 경우이며 그림 7 (c)는  $\hat{r}_1$ 과  $\hat{r}_2$ 의 위상이 각각  $\pi/2$  이고  $\pi$ 인 경우이다. 그림 7 (b) 와 그림 7 (c)를 비교하면 자연 방출 스펙트럼이  $\delta = 0$ 에 대하여 mirror image임을 볼 수 있었다.

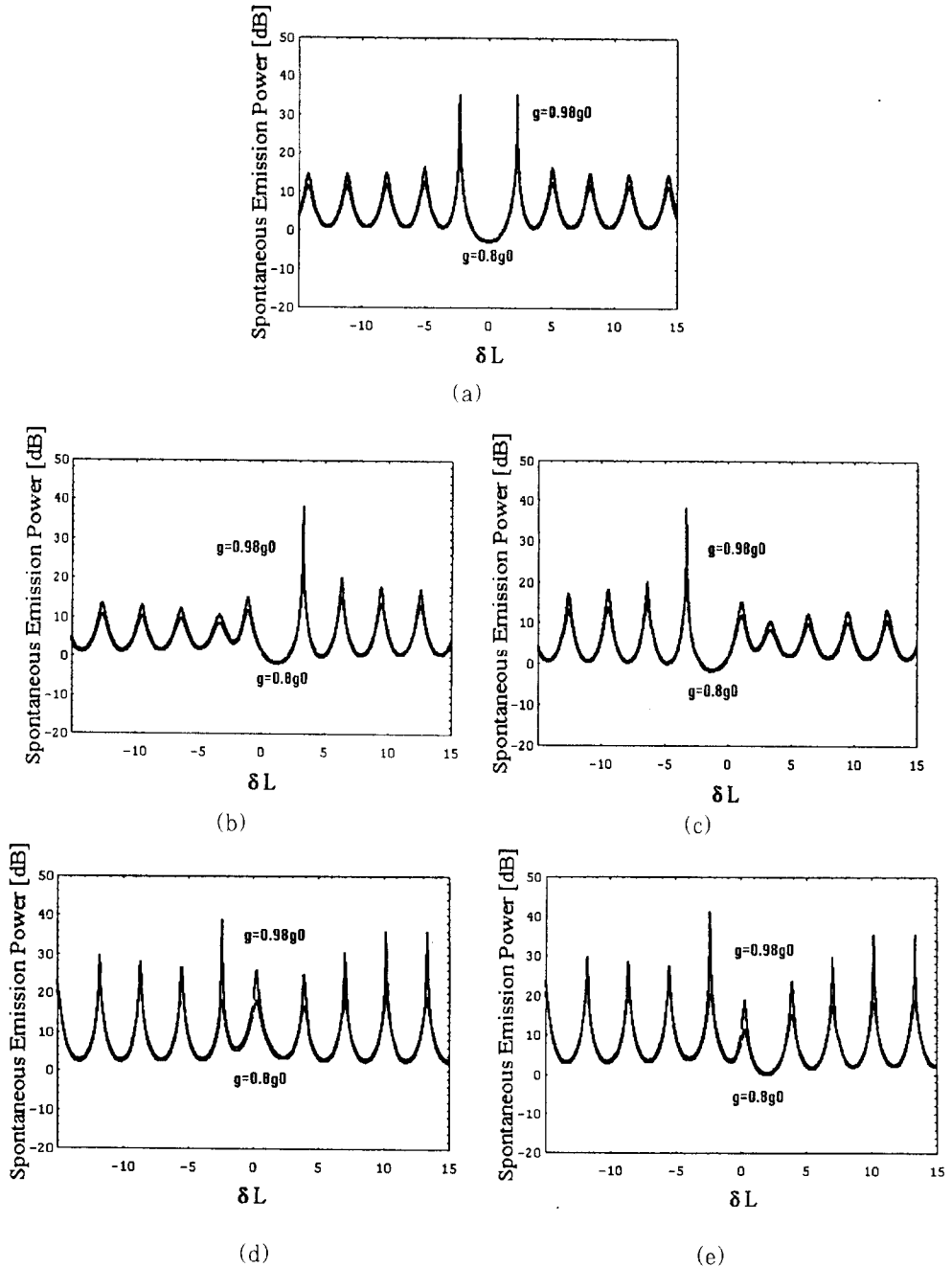
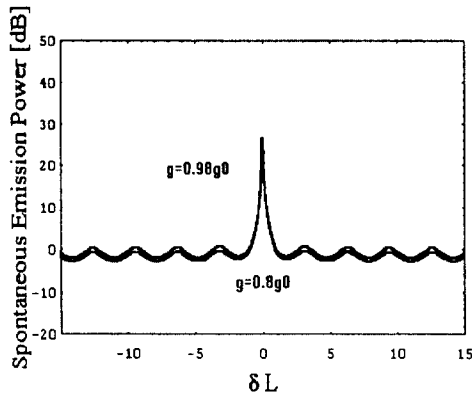
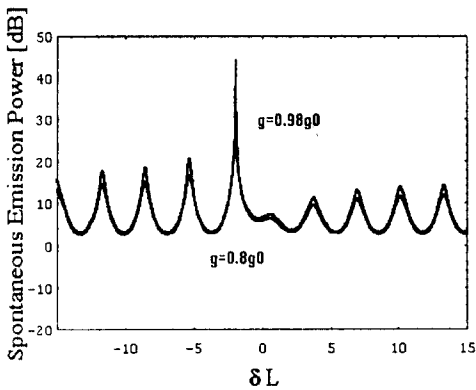


그림 6. 단면반사가  $|\hat{r}_1| = 0.524$  이고  $|\hat{r}_2| = 0.524$  인 경우 회절격자가 index coupling만을 가진 경우에 여러가지  $\hat{r}_1$  과  $\hat{r}_2$  의 위상값에 대한 DFB 구조소자의 자연방출 스펙트럼.

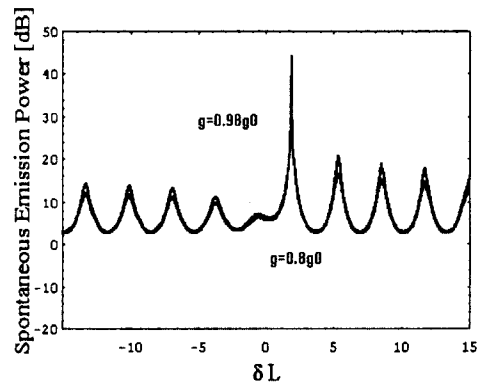
- (a)  $\hat{r}_1$  의 위상 =  $-\pi/2$ ,  $\hat{r}_2$  의 위상 =  $-\pi/2$ . (b)  $\hat{r}_1$  의 위상 = 0,  $\hat{r}_2$  의 위상 = 0. (c)  $\hat{r}_1$  의 위상 =  $\pi$ ,  $\hat{r}_2$  의 위상 =  $\pi$ . (d)  $\hat{r}_1$  의 위상 = 0,  $\hat{r}_2$  의 위상 =  $\pi/2$ . (e)  $\hat{r}_1$  의 위상 =  $\pi/2$ ,  $\hat{r}_2$  의 위상 = 0.
- Fig. 6. Spontaneous emission spectra of a device using DFB structures with facet reflections  $|\hat{r}_1| = 0.524$  and  $|\hat{r}_2| = 0.524$  for various phases of  $\hat{r}_1$  and  $\hat{r}_2$  in the case of pure index coupling. (a) The phase of  $\hat{r}_1 = -\pi/2$ , the phase of  $\hat{r}_2 = -\pi/2$ . (b) The phase of  $\hat{r}_1 = 0$ , the phase of  $\hat{r}_2 = 0$ . (c) The phase of  $\hat{r}_1 = \pi$ , the phase of  $\hat{r}_2 = \pi$ . (d) The phase of  $\hat{r}_1 = 0$ , the phase of  $\hat{r}_2 = \pi/2$ . (e) The phase of  $\hat{r}_1 = \pi/2$ , the phase of  $\hat{r}_2 = 0$ .



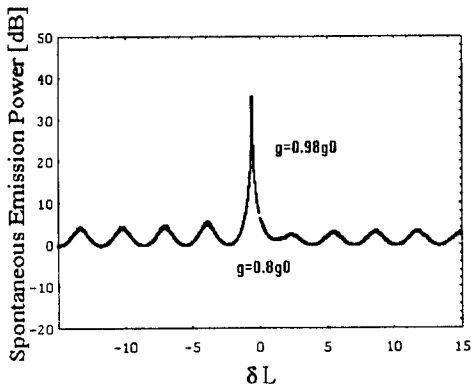
(a)



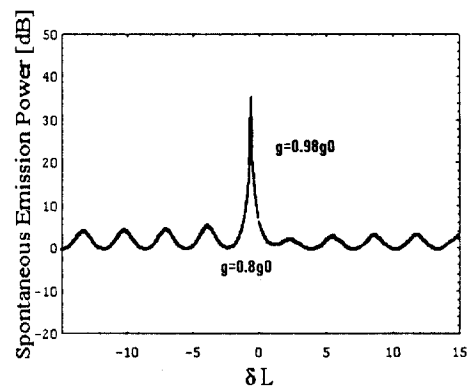
(b)



(c)



(d)



(e)

그림 7. 단면반사가  $|\hat{r}_1| = 0.524$  이고  $|\hat{r}_2| = 0.524$  인 경우 회절격자가 gain coupling만을 가진 경우에 여러가지  $\hat{r}_1$ 과  $\hat{r}_2$ 의 위상값에 대한 DFB 구조소자의 자연방출 스펙트럼.

(a)  $\hat{r}_1$ 의 위상=0,  $\hat{r}_2$ 의 위상=0, (b)  $\hat{r}_1$ 의 위상= $-\pi/2$ ,  $\hat{r}_2$ 의 위상= $\pi$ , (c)  $\hat{r}_1$ 의 위상= $\pi/2$ ,  $\hat{r}_2$ 의 위상= $\pi$ , (d)  $\hat{r}_1$ 의 위상= $-\pi/2$ ,  $\hat{r}_2$ 의 위상=0, (e)  $\hat{r}_1$ 의 위상=0,  $\hat{r}_2$ 의 위상= $-\pi/2$ .

Fig. 7. Spontaneous emission spectra of a device using DFB structures with facet reflection  $|\hat{r}_1| = 0.524$  and  $|\hat{r}_2| = 0.524$  for various phases of  $\hat{r}_1$  and  $\hat{r}_2$  in the case of pure gain coupling. (a) The phase of  $\hat{r}_1 = 0$ , the phase of  $\hat{r}_2 = 0$ .

(b) The phase of  $\hat{r}_1 = -\pi/2$ , the phase of  $\hat{r}_2 = \pi$ , (c) The phase of  $\hat{r}_1 = \pi/2$ , the phase of  $\hat{r}_2 = \pi$ , (d) The phase of  $\hat{r}_1 = -\pi/2$ , the phase of  $\hat{r}_2 = 0$ , (e) The phase of  $\hat{r}_1 = 0$ , the phase of  $\hat{r}_2 = -\pi/2$ .

그림 7 (d)는  $\hat{\kappa}_1$ 과  $\hat{\kappa}_2$ 의 위상이 각각  $-\pi/2$ 이고 0 인 경우이며 그림 7 (e)는  $\hat{\kappa}_1$ 과  $\hat{\kappa}_2$ 의 위상이 각각 0 과  $-\pi/2$  인 경우이다. 이 두 경우는 투과 이득 스펙트럼은 같고  $x_2$ 가 다른 경우로서 자연 방출 스펙트럼이 stop band내에서 아주 미세하게 달라짐을 볼 수 있었다. Gain coupling만을 가지는 경우의 그림 7 (d)와 (e)에 있어서의 파장에 따른  $x_2$ 의 차이는 index coupling만을 가지는 경우의 그림 6 (d)와 (e)에 있어서의 파장에 따른  $x_2$ 의 차이보다 매우 작음을 알 수 있다.

Gain coupling만을 가지는 경우의 자연 방출 스펙트럼을 index coupling만을 가지는 경우의 자연 방출 스펙트럼과 비교했을 때 일반적으로 SMSR이 향상되고  $\hat{\kappa}_1$ 과  $\hat{\kappa}_2$ 의 위상변화의 영향을 작게 받음을 알 수 있다.

## V. 결 론

Index coupling 과 gain coupling 이 동시에 존재하며 양 단면의 반사와 회절격자의 위상이 고려된 결합모드 방정식의 해로부터 transfer matrix 방법과 다중반사법을 이용하여 양 단면에서 방출되는 자연방출 스펙트럼에 관한 analytic 해를 얻었다. 유도된 analytic 해로부터 DFB 구조 소자의 중요 파라메타들이 자연방출 스펙트럼에 미치는 영향을 알아보기 위하여 또한 경우의 수를 줄이기 위하여 파라메타들과 자연방출 스펙트럼과의 관계를 구하였다. 단면 2에로의 자연방출 스펙트럼의 결과는 단면 1에로의 자연방출 스펙트럼에 그대로 적용될 수 있음을 알 수 있었다.

Index coupling 과 gain coupling 이 동시에 존재하는 경우는  $x'L$ 의 coupling 세기를 가지며 단면 반사가 각각  $\hat{\kappa}_1$ 과  $\hat{\kappa}_2$ 를 가지는 DFB 구조 소자의 투과 이득 스펙트럼과  $x'L$ 의 coupling 세기를 가지며 단면 반사가 각각  $-\hat{\kappa}_1^*$ 와  $-\hat{\kappa}_2^*$ 를 가지는 DFB 구조 소자의 투과 이득 스펙트럼은  $\delta = 0$ 에 대하여 mirror image 의 관계를 가진다. 따라서 index coupling 과 gain coupling이 동시에 존재하는 DFB 구조 소자의 자연방출 스펙트럼은  $\delta = 0$ 에 대하여 대칭이 아님을 알 수 있다. Index coupling 만이 존재하는 경우와 gain coupling 만이 존재하는 경우는  $\delta = 0$ 에 대하여 mirror image 가 존재하기 때문에  $\hat{\kappa}_1$ 과  $\hat{\kappa}_2$ 의 위상을  $\pi/2$  간격으로 변화시키는 경우 경우의 수가 16가지에

서 10가지로 줄게 되며 그 중 4 가지 경우는 자연방출 스펙트럼이  $\delta = 0$ 에 대하여 대칭이다.

DFB 구조 소자의 중요 파라메타들이 자연방출 스펙트럼에 미치는 영향을 알아보기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 행하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 자연방출 스펙트럼으로부터 중요 파라메타들의 값을 추정할 수 있는 가능성을 확인하였다. 또한 자연방출 스펙트럼과 중요 파라메타들간의 관계가 성립됨을 확인하였다. Gain coupling 만을 가지는 경우가 Index coupling 만을 가지는 경우에 비하여 일반적으로 DFB 구조 소자의 SMSR 이 향상됨을 확인할 수 있었고 또한 자연방출 스펙트럼이 단면 반사 계수의 크기, 회절 격자의 위상 및 길이의 영향을 적게 받음을 확인할 수 있었다. 본 논문은 한국 통신 연구 개발원 장기 기초 연구 사업과 '93년도 교육부 반도체 분야 학술 연구 조성비 지원에 의하여 이루어졌습니다.

## 참 고 문 헌

- [1] G. P. Agrawal and N. K. Dutta, *Semiconductor Lasers*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1993.
- [2] H. Soda and H. Imai, "Analysis of the Spectrum Behavior Below the Threshold in DFB Lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol. QE-22, No.5, pp. 637 - 641, 1986.
- [3] T. Makino and J. Glinski, "Transfer matrix analysis of the amplifier spontaneous emission of DFB semiconductor laser amplifiers," *IEEE J. Quantum Electron* Vol. 24, No. 8, pp. 1507 - 1518, 1988.
- [4] M. J. Chawki, R. Auffret, E. L. Coquil, P. Pottier, L. Berthou, H. Paciullo, and J. L. Bihan, "Two-Electrode DFB Laser filter Used as a Wide Tunable Narrow-Band FM Receiver," *J. Lightwave Technology* Vol. 10, No. 10, 1992.
- [5] B. G. Kim and E. Garmire, "Comparison between the matrix method and the coupled-wave method in the analysis of Bragg reflector structures," *J. Opt. Soc. Am.A.*, vol. 9, No. 1, pp. 132-136, 1992.

— 저 자 소 개 —



金 富 均(正會員)

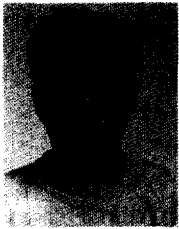
1979년 2월 서울대학교 전자공학과 공학사. 1981년 2월 한국과학기술원 전기및 전자공학과 공학석사. 1989년 8월 University of Southern California 공학박사. 1993년 6월 ~ 8월

IBM Almaden 연구소 방문 연구원. 1981년 3월 ~ 현재 숭실대학교 전자공학과 부교수. 주관심분야: 광소자, 광통신시스템, 광정보장치등



崔 智 然(正會員)

1969년 11월 30일생. 1992년 2월 숭실대학교 전자공학과 공학사. 1994년 2월 숭실대학교 전자공학과 공학석사. 1994년 2월 현재 한국 전자통신 연구소 연구원. 주관심분야 : 광소자, 광통신시스템, 광정보장치등



丁 基 碩(正會員)

1970년 12월 1일생. 1994년 2월 숭실대학교 전자공학과 공학사. 1994년 2월 ~ 현재 숭실대학교 대학원 재학

趙 成 贊(正會員)

1991년 2월 숭실대학교 전자공학과 공학사. 1993년 2월 숭실대학교 전자공학과 공학석사. 1993년 2월 ~ 현재 숭실대학교 부설 생산 기술연구소 전자공학부 전담연구원. 주관심분야 : 광소자, 광통신시스템, 광정보장치등



李 奉 永(正會員)

1957년 4월 20일 생. 1985년 2월 고려대학교 물리학과 졸업. 1989년 3월 일본 오사카대학 전기공학분야 물리계 석사. 1992년 3월 일본 오사카대학 전기공학분야 물리계 박사. 1984년 12월 ~ 1985년 삼성정밀 연구소. 1986년 4월 ~ 1987년 3월 일본 오사카대학 전기공학과 연구생. 1992년 9월 ~ 현재 한국통신연구개발원 선임연구원. 주관심분야 : High-Speed/Wideband Optical Transmission System

1992년 9월 ~ 현재 한국통신연구개발원 선임연구원. 주관심분야 : High-Speed/Wideband Optical Transmission System