

論文96-33A-7-26

다중 구역 DFB 구조 소자의 자연 방출 스펙트럼에 관한 해석

(Analysis of the Spontaneous Emission Spectrum of a Multisection DFB structure device)

丁基碩*, 金富均*, 李奉永**

(Ki Suk Jeung, Boo-Gyoun Kim, and Bong Young Lee)

요 약

양 단면의 반사, index coupling 및 gain coupling 을 동시에 고려할 수 있는 complex coupled 회절 격자와 각 구역의 회절 격자의 위상이 독립적으로 고려된 다중 구역 DFB 구조 소자의 자연 방출 스펙트럼에 관한 analytic 식을 결합 모드 방정식의 해에 전달 행렬과 다중 반사 방법을 사용하여 유도하였다. 해석에 사용된 다중 구역 DFB 구조 소자는 complex coupled 회절 격자 구역, 회절 격자가 없는 구역 및 각 구역의 회절 격자의 위상이 연속적이지 않는 경우도 포함되는 일반적인 모델이다. 회절 격자의 coupling 특성이 index coupling 만을 가지며 각 구역에서의 회절 격자의 위상 ϕ_k 이 '0' 인 경우 - 각 구역의 회절 격자의 위상이 연속-유도된 자연 방출스펙트럼 식은 Makino 와 Glinski 가 유도한 자연 방출 스펙트럼과 같아짐을 확인하였다.

유도된 자연방출 스펙트럼식을 이용하여 파장 가변 소자로 사용되어지고 있는 위상 천이 조정 DFB 구조 소자의 자연방출 스펙트럼에 관한 analytic 식을 유도하였다. 유도된 자연방출 스펙트럼의 식에 위상 천이 조정 구역에서의 위상 천이와 각 회절 격자의 위상 차이의 합으로 표현되는 유효 위상 천이 파라메타를 도입하여 자연방출 스펙트럼식에 포함되는 파라메타들의 수를 줄였다. 또한 중요 파라메타들이 자연 방출 스펙트럼 및 동작 특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 중요 파라메타들과 자연방출 스펙트럼과의 관계를 나타내는 식을 구하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 자연 방출 스펙트럼과 중요 파라메타들간의 관계를 확인하였고 자연 방출 스펙트럼으로부터 중요 파라메타들의 값을 추정할 수 있는 가능성을 확인하였다.

Abstract

We derive analytic expressions for the spontaneous emission spectrum (SES) of a multisection distributed feedback (DFB) structure device employing complex coupled gratings including the effects of both facets reflections. The multisection DFB structure device used in the analysis is a general model which allows the independent phase of a grating in each section, and the sections without gratings. The expressions are the same as those derived by Makino and Glinski in case the gratings are index coupled and the phase of a grating in each section, ϕ_k , is '0' which means the phase of gratings in the device is continuous. The expressions for the SES of a phase-shift-controlled (PSC) DFB structure device using tunable devices are derived from the general expressions. The number of parameters of the expressions is reduced by using the parameter of effective phase shift defined by the sum of the phase shift in a PSC region and the difference of the phase of a grating in each active region. Equations showing the effect of both facets reflections and the effective phase shift on the SES are derived. The validity of the equations is verified by computer simulations. Computer simulation results also show the possibility of evaluating the structure parameters of the device from its SES.

* 正會員, 崇實大學校 電子工學科
(Dep.t of Elec. Eng., SoongSil University)

(Korea Telecom Research Laboratories)

接受日字: 1996年1月5日, 수정완료일: 1996年5月15日

** 正會員, 韓國通信 研究開發本部

I. 서론

Distributed feedback (DFB) 구조를 사용한 소자들은 고속 변조시 단일 모드로 동작하며 좁은 발진 선풍을 가지고, 길이 방향의 모드가 안정적이라는 장점을 가지기 때문에 고속 광통신 시스템을 구현하기 위한 핵심 소자이다¹¹. 또한 다중 구역 DFB 구조 소자 (multisection DFB structure device)나 다중 구역 distributed Bragg reflector (DBR) 구조 소자는 파장 분할 다중화 광통신 시스템 구현을 위하여 필요한 파장 가변 레이저나 파장 가변 필터로 사용되어지기 때문에 많은 연구가 진행되고 있다¹². DFB 구조소자의 동작 특성은 그 소자의 기본 파라메타인 결합 계수, 단면 반사 계수와 회절 격자의 위상 등에 의해 많은 영향을 받는것으로 알려져 있다¹³. 그러므로 DFB 구조 소자의 파라메타들의 값들을 추정하고 동작 특성을 해석하기 위하여 문턱 전류값 이하에서 발생하는 소자의 자연 방출 스펙트럼에 관한 많은 연구가 진행되어져 왔다¹⁴⁻¹⁶.

Soda 와 Imai 는 결합 모드 이론 (Coupled mode theory) 과 다중반사법을 이용하여 DFB 구조 소자의 자연방출 스펙트럼에 관한 식을 적분 형태로 표현하여 수치 해석 방법을 사용하여 분석하였으며¹⁴, Makino 와 Glinski 는 양 단면 반사를 고려한 다중 구역 DFB 구조 소자의 자연방출 스펙트럼에 관한 analytic 식을 얻고 분석하였다¹⁵. 그러나 Makino와 Glinski 는 회절 격자의 coupling mechanism 이 index coupling 만을 가지고 다중 구역 DFB 구조 소자의 각 구역간의 회절 격자의 위상이 연속인 경우에 대해서 자연 방출 스펙트럼에 관한 analytic 식을 얻었다.

회절 격자의 coupling mechanism 이 gain coupling 만을 가지는 경우, index coupling 만을 가지는 경우에 비하여 발진 모드의 이중성 (degeneracy) 문제를 해결할수있고 수율이 향상되는 여러가지 장점을 가지고 있기 때문에 coupling mechanism 이 complex coupling (index coupling 만, gain coupling 만, 혹은 index coupling 과 gain coupling 을 동시에 가지는) 인 회절 격자를 사용하는 DFB 구조 소자들에 대하여 최근에 많은 연구가 행해지고있다¹⁷.

본 논문에서는 index coupled, gain coupled 또는 complex coupled 회절 격자를 가지며 각 구역내 회절

격자의 위상이 독립적인 다중 구역 DFB 구조소자의 자연 방출 스펙트럼에 관한 analytic 식을 양 단면 반사와 index coupling 과 gain coupling 을 동시에 고려할수있는 complex coupled 회절 격자의 위상이 고려된 결합 모드 방정식의 해에 전달 행렬 방법과 다중 반사 방법을 사용하여 유도하였다. 유도된 다중 구역 DFB 구조 소자의 자연방출 스펙트럼에 관한 식은 각 구역의 특성이 같고 회절 격자가 연속이면 단일 구역 DFB 구조소자의 자연방출 스펙트럼의 식과 일치하며, index coupling 만을 가지며 각 구역에서의 회절 격자의 위상 ϕ_k 이 '0' - 각 구역간의 회절 격자의 위상이 연속 - 이면 Makino 와 Glinski 가 유도한 식과 일치함을 확인하였다.

유도된 일반적인 다중 구역 DFB 구조 소자의 자연 방출 스펙트럼식으로부터 파장 가변 레이저와 필터로 사용되어지고 있는 위상 천이 조정 (Phase-shift-controlled) DFB 구조 소자의 자연방출 스펙트럼에 관한 analytic 식을 유도하였다. 위상 천이 조정 구역에서의 위상 천이와 각 회절 격자의 위상 차이의 합으로 표현되는 유효 위상 천이 파라메타를 도입하여 자연방출 스펙트럼식에 포함되는 파라메타들의 수를 줄일 수 있었다. 또한 중요 파라메타들이 자연 방출 스펙트럼 및 동작 특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 중요 파라메타들과 자연방출 스펙트럼과의 관계를 구하였다.

컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 자연 방출 스펙트럼과 중요 파라메타들간의 관계를 확인하였고 자연 방출 스펙트럼으로부터 중요 파라메타들의 값을 추정할 수 있는 가능성을 확인하였다. 회절 격자의 coupling mechanism 이 gain coupling 만을 가지는 경우가 index coupling 만을 가지는 경우에 비하여 일반적으로 SMSR (side mode suppression ratio) 이 향상됨을 확인할 수 있었으며, 중요 파라메타 값들의 변화가 자연 방출 스펙트럼에 미치는 영향이 작음을 확인할 수 있었다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 양 단면의 반사, index coupling 및 gain coupling 을 동시에 고려할수있는 complex coupled 회절 격자와 각 구역의 회절 격자의 위상이 독립적으로 존재할수있는 다중 구역 DFB 구조 소자의 자연방출 스펙트럼에 관한 analytic 식을 결합모드 방정식의 해에 전달 행렬 방법과 다중 반사 방법을 사용하여 유도한다. III 장에서는

유도된 자연방출 스펙트럼에 관한 analytic 식으로부터 위상 천이 조정 DFB 구조 소자의 자연방출 스펙트럼에 관한 식을 유도한다. 유도된 위상 천이 조정 DFB 구조 소자의 자연방출 스펙트럼 식에 유효 위상 천이 파라메타를 도입하여 식을 간략화한다. 또한 양 단면 반사계수의 위상과 유효 위상 천이가 자연방출 스펙트럼에 미치는 영향을 나타내는 관계식을 유도한다. IV 장에서는 양 단면 모두 무반사 코팅, 한 단면은 무반사 코팅 다른 단면은 절개면, 양 단면 모두 절개면을 가지는 3 가지 경우에 대하여, 양 단면 반사 계수의 위상과 유효 위상 천이값을 각각 $\pi/2$ 만큼 변화시키며 위상 천이 조정 DFB 구조 소자의 자연방출 스펙트럼들에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 보인다. V 장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 다중 구역 DFB 소자의 자연 방출 스펙트럼에 관한식 유도

그림 1과 같은 기본적인 DFB 구조에서 index coupling 과 gain coupling 이 동시에 존재할 경우 +z 방향으로 -z 방향으로 진행되는 파의 복소진폭 $A(z)$ 와 $B(z)$ 사이의 관계는 다음과 같은 결합모드 방정식으로 나타낼 수 있다⁽⁸⁾.

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

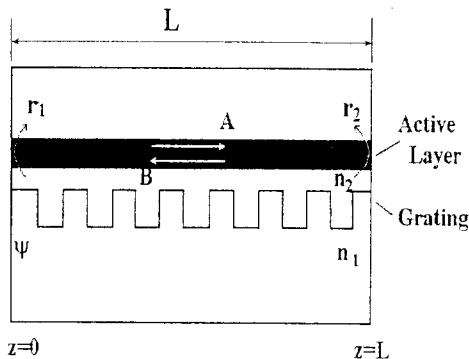


그림 1. 기본적인 DFB 구조소자의 개략도

Fig. 1. Schematic diagram of a basic DFB structure device.

여기서 g 는 평균 알짜 필드 이득 계수이고 κ 는 index coupling 계수, f 는 gain coupling 계수, θ

는 gain 회절격자의 위상과 index 회절 격자의 위상차, ψ 는 $z=0$ (입력단면) 에서의 index 회절 격자의 위상, $\delta = \beta - (m\pi/\Lambda) = \beta - \beta_0$ 는 Bragg 주파수, β_0 , 로부터의 변이이다.

제작상의 어려움으로 대부분의 DFB 레이저는 gain 회절 격자의 위상과 index 회절격자의 위상차 θ 가 0 이거나 또는 π 이다. 본 논문에서는 $\theta = 0$ 인 경우만 고려하였으며 $\theta = \pi$ 일때는 결합 계수가 θ 가 0 일때의 값의 공액 복소수이므로, 그 결과는 $\theta = \pi$ 인 경우에 그대로 적용될 수 있다. 또한 회절 격자의 위상 ψ 는 참고 문헌 9의 그림 2 와 같이 정의하였다.

식 (1) 으로 주어진 결합모드 방정식의 해로부터 DFB 구조 소자의 임의의 두 위치 $z=z$ 와 $z=z_a$ 에서의 전개 $E_A(z)$, $E_A(z_a)$ 와 $E_B(z)$, $E_B(z_a)$ 의 관계는 다음과 같은 전달 행렬로 표시된다⁽⁹⁾.

$$\begin{bmatrix} E_A(z) \\ E_B(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11}(z-z_a) & F_{12}(z-z_a) \\ F_{21}(z-z_a) & F_{22}(z-z_a) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_A(z_a) \\ E_B(z_a) \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서

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

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

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

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

이며 $S^2 = x'^2 - \delta'^2$, $x' = x - if$ 이고 $\delta' = \delta + ig$ 이다.

그림 2 와 같은 서로 다른 n 개의 구역으로 구성되는 일반적인 다중 구역 DFB 구조 소자를 생각하자. 그림 2 와 같은 소자의 k 번째 구역은 길이가 l^k ($l^k = z_{k+1} - z_k$) 이며 전달 행렬은 F^k 를 가진다. 또한 각 구역은 index coupled 회절 격자, gain coupled 회절 격자, complex coupled 회절 격자, 또는 회절 격자가 존재하지 않을 수도 있으며, 각 구역의 회절 격자의 위상은 다른 구역의 회절 격자의 위상에 관계없이 독립적인 위상을 가지며, 단면 반사 계수는 r_1 과 r_2 를 가진다고 가정하였다. 따라서 그림 2 와 같은 다중 구역 DFB 구조 소자는 Makino 와

Glinski^[5]가 사용한 모델을 포함하는 일반적인 다중 구역 DFB 구조 소자라 할수있다. k 번째 구역에서의 전계 $E_A^k(z)$, $E_B^k(z)$ 와 $E_A^k(z_k)$, $E_B^k(z_k)$ 의 관계는 식 (2) 와 비슷하게 다음과 같이 표현된다.

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

k 번째 구역에서 각각 단면 i(i = 1, 2) 로의 단위 주파수 대역폭당 자연방출 파워 p_{Nik} 는 다음과 같이 표현된다^[5].

$$p_{Nik} = (1-|r_i|^2) \int_{z_k}^{z_{k+1}} 2hf n_{spk} g_k T_{ik}(z) dz \quad (4)$$

여기서

$$T_{ik} = (|x_{ik}|^2 + |y_{ik}|^2) / |D_k|^2,$$

$$D_k = H_{22}^{n1} + r_1 H_{21}^{n1} - r_2 H_{12}^{n1} - r_1 r_2 H_{11}^{n1}, H^{n1} = F^{nk} F^{k1} \quad (5)$$

$$F^{nk} = \left(\prod_{i=k+1}^n F^i \right) F^k(z_{k+1} - z),$$

$$F^{k1} = F^k(z_{k+1} - z) \left(\prod_{i=1}^{k-1} F^i \right) \quad (6)$$

$$\begin{cases} x_{2k} = r_1 F_{21}^{k1}(z-z_k) + F_{22}^{k1}(z-z_k) \\ y_{2k} = r_1 F_{11}^{k1}(z-z_k) + F_{12}^{k1}(z-z_k) \end{cases}, \quad (7)$$

$$\begin{cases} x_{1k} = F_{11}^{-nk}(z_{k+1}-z) + r_2 F_{12}^{-nk}(z_{k+1}-z) \\ y_{1k} = F_{21}^{-nk}(z_{k+1}-z) + r_2 F_{22}^{-nk}(z_{k+1}-z) \end{cases}$$

이고 $F^{-nk} = (F^{nk})^{-1}$ 이다.

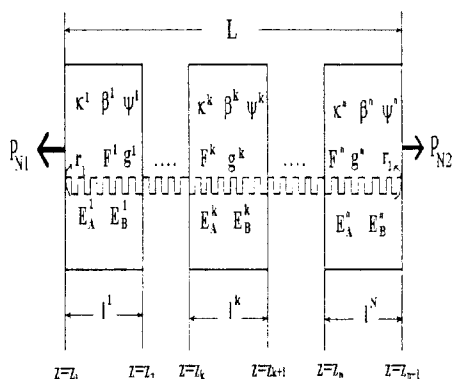


그림 2. 중 구역 DFB 구조 소자의 개략도
Fig. 2. Schematic diagram of a multisection DFB structure device.

따라서 그림 2의 다중 구역 DFB 구조 소자에서 단

면 i (i=1,2)으로 방출되는 단위 대역폭당 자연 방출 스펙트럼 파워는 식 (4) 와 같이 표현되는 n 개의 구역에서의 자연 방출 파워의 기여분의 합으로 p_{Ni} 는 다음과 같이 표현된다.

$$p_{Ni} = hfG \sum_{k=1}^n n_{spk} \chi_{ik} \quad (i = 1,2) \quad (8)$$

여기서 hf 는 광자의 energy, n_{spk} 는 k 번째 구역에서 유도 방출에 대한 자연 방출의 비이며 G 는 투과 증폭율로서 다음과 같이 표현된다.

$$G = (1 - |r_1|^2)(1 - |r_2|^2) / |D|^2 \quad (9)$$

여기서 $D = D_k$ 이며 χ_{ik} 는 다음과 같이 표현된다.

$$\chi_{ik} = \frac{g_k \{ \exp(2S_{kr} L_k) - 1 \}}{4 |S_k|^2 S_{kr} (1 - |\hat{r}_j|^2)} \cdot$$

$$\{ |v_{ik}(S_k - \delta_k'') + ix_k' \hat{r}_j u_{ik}|^2 + | \hat{r}_j u_{ik}(S_k + \delta_k'') - ix_k' v_{ik} |^2 \}$$

$$+ \frac{g_k (1 - \exp(-2S_{kr} L_k))}{4 |S_k|^2 S_{kr} (1 - |\hat{r}_j|^2)} \cdot$$

$$\{ |v_{ik}(S_k + \delta_k'') - ix_k' \hat{r}_j u_{ik}|^2 + | \hat{r}_j u_{ik}(S_k - \delta_k'') + ix_k' v_{ik} |^2 \}$$

$$+ \frac{2g_k}{4 |S_k|^2 S_{kr} (1 - |\hat{r}_j|^2)} \text{Im} \left[\left\{ |v_{ik}|^2 (S_k - \delta_k'') (S_k + \delta_k'')^* - | \hat{r}_j u_{ik} x_k'|^2 - |v_{ik} x_k'|^2 + | \hat{r}_j u_{ik}|^2 (S_k + \delta_k'') (S_k - \delta_k'')^* - \hat{r}_j^* v_{ik} u_{ik}^* ((ix_k')^* (S_k - \delta_k'') - (-ix_k') (S_k - \delta_k'')^*) + \hat{r}_j v_{ik}^* u_{ik} \{ (ix_k') (S_k + \delta_k'')^* - (-ix_k')^* (S_k + \delta_k'') \} \right\} \right] \cdot$$

$$\{ \exp(2iS_{ki} L_k) - 1 \} \quad (10)$$

여기서

$$\delta_k'' = -i\delta_k' = g_k - i\delta_k, x_k' = x_k - if_k,$$

$$S_k = x_k'^2 - \delta_k'^2, S_{kr} = \text{Re}(S_k), S_{ki} = \text{Im}(S_k)$$

$$\hat{r}_1 = r_1 \exp[i(\psi_k + 2\beta_0 z_k)],$$

$$\hat{r}_2 = r_2 \exp[-i(\psi_k + 2\beta_0 z_{k+1})]$$

이고 $\hat{r}_i = \begin{cases} \hat{r}_1 & \text{for } i = 2 \\ \hat{r}_2 & \text{for } i = 1 \end{cases}$ 이다.

식 (10) 에 포함되어 있는 변수들은 다음과 같다.

$$u_{2k} = \frac{H_{12}^{k+1} + r_1 H_{11}^{k+1}}{r_1}, v_{2k} = r_1 H_{21}^{k+1} + H_{22}^{k+1}$$

$$u_{1k} = \frac{H_{21}^{nk+1} - r_2 H_{11}^{nk+1}}{r_2}, v_{1k} = H_{22}^{nk+1} - r_2 H_{12}^{nk+1} \quad (11)$$

여기서

$$H^{k+1} = \prod_{i=1}^{k-1} F^i \text{ 이고 } H^{n+1} = \prod_{i=k+1}^n F^i \text{ 이다. (12)}$$

단면 1과 단면 2로의 자연 방출 스펙트럼 p_M 과 p_{N2} 는 투과 증폭을 G 를 공통의 파라메타로서 포함하고 있다. 또한 식 (10)에서 보면 x_{2k} 에는 \hat{r}_1 , u_{2k} 와 v_{2k} 를 사용하고 x_{1k} 에는 \hat{r}_2 , u_{1k} 와 v_{1k} 를 사용하여 한다는 것을 제외하고는 같은 형태의 식임을 알 수 있다. 따라서 그림 2 와 같은 일반적인 다중 구역 DFB 구조 소자가 가운데를 중심으로 대칭인 특성을 가지면 $H^{k+1} = H^{n+1}$, $H_{12}^{k+1} = -H_{21}^{k+1}$ 이고 $r_1 = r_2$ 이므로 x_{1k} 와 x_{2k} 가 같아져 단면 1에로의 자연 방출 스펙트럼과 단면 2 로의 자연 방출 스펙트럼은 같음을 알 수 있다. 그러므로 단면 2에로의 자연 방출 스펙트럼 p_{N2} 의 결과는 그대로 단면 1에로의 자연 방출 스펙트럼 p_M 에 적용할 수 있음을 알 수 있다.

각 구역의 특성이 같고 회절 격자의 위상이 연속이면 식 (12) 의 H^{k+1} , H^{n+1} 로 표현되는 행렬은 단위 행렬이 되어 다중 구역 DFB 구조 소자의 자연 방출 스펙트럼에 관한 식은 참고문헌 9 에서 유도된 단일 구조 DFB 구조 소자의 자연 방출 스펙트럼의 식과 같아진다. 또한 각 구역의 회절 격자가 index coupling 만을 가지고 회절 격자의 위상, ϕ_k 가 '0'인 경우 각 구역의 회절 격자의 위상이 연속인 경우는 Makino 와 Glinski 가 유도한 자연 방출 스펙트럼에 관한 식 [5] 과 같아진다.

III. 위상 천이 조정 DFB 구조 소자의 자연 방출 스펙트럼

II 장에서 유도한 다중 구역 DFB 구조 소자의 자연 방출 스펙트럼에 관한 식을 이용하여 파장 가변 레이저나 필터로 사용되어지며 또한 위상 천이 DFB 레이저를 포함할수있는 위상 천이 조정 DFB 구조 소자의 자연방출 스펙트럼에 관하여 유도하고 컴퓨터 시뮬레이션을 행하였다. 컴퓨터 시뮬레이션에 사용된 위상 천이 조정 DFB 구조 소자의 개략도를 그림 3 에 보인다. 양 활성층 영역은 회절 격자가 존재하며 이득을 가지는 영역으로 그 특성을 F^1 , F^3 의 전달 행렬로 표현할수있다. 가운데의 위상 천이 조정 영역은 회절 격자가 존재하지 않으며 알짜 필드 이득 계수 g_2 가 '0' 인 영역이다. 따라서 위상 천이 조정 영역의 특성을 나타

내는 전달행렬 F^2 의 각 원소는 다음과 같이 표현된다.

$$F_{11}^2 = \exp[-i(\Omega/2 + \beta_{02}L_2)] \quad , \quad F_{22}^2 = 1/F_{11}^2, \\ F_{12}^2 = F_{21}^2 = 0 \quad (13)$$

여기서 $\Omega = 2\delta L_2$ 로서 위상 천이 조정 영역에서 발생하는 위상 천이를 나타낸다.

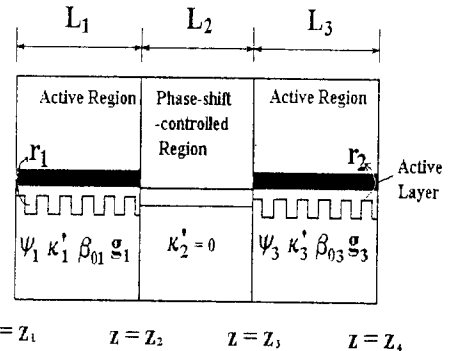


그림 3. 위상 천이 조정 DFB 구조 소자의 개략도
Fig. 3. Schematic diagram of a PSC DFB structure device.

양 활성층구역에서의 특성과 길이가 같다고 가정하고 식 (13) 와 식 (11) 를 이용하면 위상 천이 조정 DFB 구조 소자의 자연 방출 스펙트럼을 구성하는 u_{ik} 와 v_{ik} 는 다음과 같다.

$$u_{11} = \frac{\exp(-i\Omega/2)\exp\{-i\beta_0(L_2 + L_a)\}}{r_2(SL_a)^2} \cdot \\ \{ix'L_a\exp(i\phi_3)\sinh(SL_a)\exp(2i\beta_0L) \\ - r_2(i\delta - g_a)L_a\sinh(SL_a) + r_2SL_a\cosh(SL_a)\} \\ v_{11} = \frac{\exp(i\Omega/2)\exp(i\beta_0(L_2 + L_a))}{(SL_a)^2} \cdot \\ \{SL_a\cosh(SL_a) + (i\delta - g_a)L_a\sinh(SL_a) \\ + ix'r_2L_a\exp(-i\phi_3)\sinh(SL_a)\exp(2i\beta_0L)\} \quad (14)$$

$$u_{13} = 1 \\ v_{13} = 1 \quad (15)$$

$$u_{21} = 1 \\ v_{21} = 1 \quad (16)$$

$$u_{23} = \frac{\exp(-i\Omega/2)\exp\{-i\beta_0(L_2 + L_a)\}}{r_2(SL_a)^2} \cdot \\ \{r_1SL_a\cosh(SL_a) \\ - r_1(i\delta - g_a)L_a\sinh(SL_a) \\ - ix'L_a\exp(-i\phi_1)\sinh(SL_a)\}$$

$$v_{23} = \frac{\exp(i\Omega/2)\exp\{i\beta_0(L_2 + L_a)\}}{r_2(SL_a)^2} \cdot \frac{(ix'r_1L_a\exp(i\psi_1)\sinh(SL_a))}{+SL_a\cosh(SL_a) + r_1(i\delta - g_a)L_a\sinh(SL_a)} \quad (17)$$

위상 천이 조정 DFB 구조 소자의 자연 방출 스펙트럼 특성에 대하여 연구한다는 것은 자연 방출 스펙트럼식에 포함된 모든 파라메타들 - $r_1, r_2, \psi_1, \psi_3, L, xL_a$ 및 Ω - 의 변화에 의하여 자연 방출 스펙트럼이 어떤 영향을 받는가를 연구하는 것이다. 따라서 자연 방출 스펙트럼을 나타내는 식에 포함된 파라메타들의 수를 가능한 줄여야 한다. 또한 파라메타들이 자연 방출 스펙트럼에 미치는 영향을 이해하고 연구되어야 할 자연 방출 스펙트럼의 수를 줄이기 위하여 파라메타들이 자연 방출 스펙트럼에 미치는 영향을 나타내는 관계식을 구해야한다. 필터의 자연 방출 스펙트럼을 나타내는 식에 포함된 파라메타들의 수를 줄이기 위하여 각 활성층 영역에서의 회절 격자의 위상차와 위상 천이 조정 영역에서의 위상 천이와의 합으로 표현되는 유효 위상천이 Ω' 을 다음과 같이 정의한다.

$$\Omega' = \Omega + \psi_1 - \psi_3 \quad (18)$$

자연 방출 스펙트럼 식을 구성하는 투과 증폭율은 참고 문헌 10에서 유도한 위상 천이 조정 DFB 필터의 투과 이득 스펙트럼과 같은 식이 되며 투과 증폭율 G 의 분모인 D 는 유효 위상 천이 Ω' 을 사용하면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} (SL_a)^2 \exp(-i\beta_0L) D \exp[i(\psi_1 - \psi_3)/2] = & [SL_a \cosh(SL_a) + (-g_a + i\delta)L_a \sinh(SL_a)]^2 \exp(i\Omega'/2) \\ & + [x'L_a \sinh(SL_a)]^2 \exp(-i\Omega'/2) \\ & + ix'L_a \hat{r}_1 \sinh(SL_a)[SL_a \cosh(SL_a) \\ & + (-g_a + i\delta)L_a \sinh(SL_a)] \exp(i\Omega'/2) \\ & + ix'L_a \hat{r}_1 \sinh(SL_a)[SL_a \cosh(SL_a) \\ & - (-g_a + i\delta)L_a \sinh(SL_a)] \exp(-i\Omega'/2) \\ & + ix'L_a \hat{r}_2 \sinh(SL_a)[SL_a \cosh(SL_a) \\ & + (-g_a + i\delta)L_a \sinh(SL_a)] \exp[i\Omega'/2] \\ & + ix'L_a \hat{r}_2 \sinh(SL_a)[SL_a \cosh(SL_a) \\ & - (-g_a + i\delta)L_a \sinh(SL_a)] \exp[-i\Omega'/2] \\ & - \hat{r}_1 \hat{r}_2 \{ [SL_a \cosh(SL_a) \\ & - (-g_a + i\delta)L_a \sinh(SL_a)]^2 \exp(-i\Omega'/2) \end{aligned}$$

$$- \hat{r}_1 \hat{r}_2 [x'L_a \sinh(SL_a)]^2 \exp(i\Omega'/2) \quad (19)$$

여기서 \hat{r}_1 과 \hat{r}_2 은 각 영역에서 회절 격자의 위상이 고려된 단면반사율로서 다음과 같다.

$$\hat{r}_1 = r_1 \exp(i\psi_1), \quad \hat{r}_2 = r_2 \exp[-i(\psi_3 + 2\beta_0L)] \quad (20)$$

식 (19) 로부터 D 은 유효 위상천이 Ω' 에 대하여 주기가 2π 인 함수임을 알 수있다.

II장에서 기술한 바와 같이 다중 구역 DFB 구조 소자가 가운데를 중심으로 대칭인 특성을 가지면 단면 2 에로의 자연 방출 스펙트럼 p_{N2} 의 결과는 그대로 단면 1 에로의 자연 방출 스펙트럼 p_{M1} 에 적용할 수 있다. 양 활성층 영역의 특성과 길이가 같은 위상 천이 조정 DFB 구조 소자인 경우가 이 경우에 해당된다. 따라서 우리는 x_{2k} 만 고려하였으며 식 (16) 과 (17) 을 식 (10)에 대입하고 유효 위상 천이 Ω' 를 도입하면 x_{21} 은 단일 구역 DFB 구조 소자의 x_2 가 되어 Ω' 과 무관한 함수이고 x_{23} 은 Appendix 에 Ω' 의 함수로 표현하였다. 구역 2 (위상 천이 조정영역) 에서는 식 (10) 에서 보는 것처럼 g_2 가 '0' 이므로 x_{22} 는 '0' 이다. 따라서 x_{2k} 도 Ω' 의 2π 인 함수임을 알 수있다.

DFB 구조소자의 자연방출 스펙트럼은 식 (8) 에서 보는 바와 같이 투과 증폭율을 나타내는 G 와 x_{ik} 의 곱으로 주어진다. x_{ik} 가 stop band내에서는 파장에 따라 크게 변화하기 때문에 투과 증폭율과 자연방출 스펙트럼은 stop band 내에서 큰 차이를 보인다. 그러므로 파라메타들이 자연 방출 스펙트럼에 미치는 영향을 알아보기 위하여 양 단면 반사 계수의 위상과 유효 위상 천이가 투과 증폭율 G 와 x_{ik} 에 미치는 영향을 나타내는 관계식을 회절 격자의 coupling 의 종류에 따라 다음과 같이 구하였다.

1. Index coupling 과 gain coupling이 동시에 존재하는 경우 :

Index coupling 과 gain coupling 이 동시에 존재하는 경우 결합 계수 $x' = x - i\gamma$ 이다. 식 (19) 에서 $\delta \rightarrow -\delta$ 이고 $x' \rightarrow x'^*$ 이면 $S \rightarrow S^*$ 이다. 따라서 유효 위상천이 Ω' 가 $-\Omega'$ 이고 $\hat{r}_1 \rightarrow -\hat{r}_1^*$, $\hat{r}_2 \rightarrow -\hat{r}_2^*$ 이면 투과 이득스펙트럼 G는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$G(L, \delta, \hat{r}_1, \hat{r}_2, x', \Omega') = G(L, -\delta, -\hat{r}_1^*, -\hat{r}_2^*, x'^*, -\Omega') \quad (21)$$

식 (10)로 표시되는 χ_{ik} 와 파라메타들간의 관계도 투과 증폭율 G와 파라메타들간의 관계와 비슷한 관계식이 성립된다.

$$\chi_{ik}(L, \delta, \hat{r}_j, x', \mathcal{Q}) = \chi_{ik}(L, -\delta, -\hat{r}_j^*, x'', -\mathcal{Q}) \quad (22)$$

따라서 G와 χ_{ik} 의 곱으로 표시되는 자연방출 스펙트럼 p_M 와 파라메타들간의 관계는 다음과 같이 표시된다.

$$p_M(L, \delta, \hat{r}_1, \hat{r}_2, x', \mathcal{Q}) = p_M(L, -\delta, -\hat{r}_1^*, -\hat{r}_2^*, x'', -\mathcal{Q}) \quad (23)$$

\hat{r}_1, \hat{r}_2 와 x' 을 파라메타로 가지며 유효 위상 천이가 \mathcal{Q} 인 위상 천이 조정 DFB 구조 소자의 자연방출 스펙트럼과 $-\hat{r}_1^*, -\hat{r}_2^*$ 와 x'' 을 파라메타로 가지며 유효 위상 천이가 $-\mathcal{Q}$ 인 위상 천이 조정 DFB 구조 소자의 자연방출 스펙트럼은 $\delta=0$ (Bragg 파장)에 관하여 mirror image의 관계를 가진다.

2. Index coupling 만을 가지는 경우 :

Index coupling 만을 가지는 경우의 결합 계수는 $x' = x'' = x$ 이므로 (23)식은 다음과 같이 표시된다.

$$p_M(L, \delta, \hat{r}_1, \hat{r}_2, x, \mathcal{Q}) = p_M(L, -\delta, -\hat{r}_1^*, -\hat{r}_2^*, x, -\mathcal{Q}) \quad (24)$$

\hat{r}_1 과 \hat{r}_2 를 파라메타로 가지며 유효 위상 천이가 \mathcal{Q} 인 소자의 자연방출 스펙트럼과 $-\hat{r}_1^*$ 와 $-\hat{r}_2^*$ 를 파라메타로 가지며 유효 위상 천이가 $-\mathcal{Q}$ 인 소자의 자연방출 스펙트럼은 Bragg 파장에 대하여 mirror image의 관계를 가진다. 특히 $\hat{r}_1 = -\hat{r}_1^*, \hat{r}_2 = -\hat{r}_2^*$ 이고 $\mathcal{Q} = -\mathcal{Q}$ 경우는 자연방출 스펙트럼이 Bragg 파장에 대하여 대칭이다.

3. Gain coupling 만을 가지는 경우 :

Gain coupling 만을 가지는 경우의 결합 계수는 $x' = -if$ 이므로 (23)식은 다음과 같이 표시된다.

$$p_M(L, \delta, \hat{r}_1, \hat{r}_2 - if, \mathcal{Q}) = p_M(L, -\delta, \hat{r}_1^*, \hat{r}_2^*, -if, -\mathcal{Q}) \quad (25)$$

\hat{r}_1 과 \hat{r}_2 를 파라메타로 가지며 유효 위상 천이가 \mathcal{Q} 인 소자의 자연방출 스펙트럼과 \hat{r}_1^* 와 \hat{r}_2^* 를 파라메타로 가지며 유효 위상 천이가 $-\mathcal{Q}$ 인 소자의 자연방출 스펙트럼은 Bragg 파장에 대하여 mirror image의 관계를 가진다. 특히 $\hat{r}_1 = \hat{r}_1^*, \hat{r}_2 = \hat{r}_2^*$ 이고 $\mathcal{Q} = -\mathcal{Q}$ 인 경우는 자연방출 스펙트럼이 Bragg 파

장에 대하여 대칭이다.

IV. 결과 및 토의

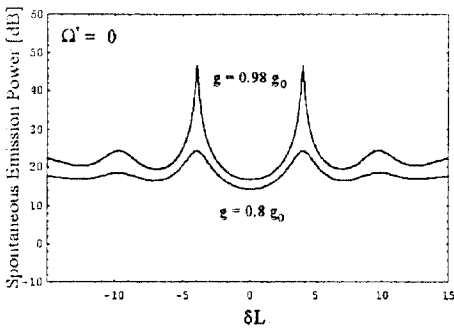
위상 천이 조정 DFB 구조 소자의 자연 방출 스펙트럼으로부터 기본 파라메타들을 추정할 수 있는 가능성을 확인하기 위하여, 또한 III장에서 유도한 자연방출 스펙트럼과 파라메타들간의 관계를 확인하기 위하여 구조 소자의 양단면 반사계수 r_1 과 r_2 가 무반사 코팅 또는 절개면을 가지는 각 경우에 있어서 회절 격자의 coupling의 종류에 따라 자연방출 스펙트럼의 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하기 위하여 사용한 파라메타 값은 다음과 같다. Coupling의 세기 $|2x'L_d| = 0.6$ 으로, 소자 내에서 발생하는 흡수 및 산란 손실 $aL = 1$ 로 또한 위상 천이 조정 DFB 구조 소자가 $1.55 \mu\text{m}$ 에서 동작한다고 가정하고 활성층 영역을 InGaAsP로 설정한 경우 절개면의 반사 계수 r 은 0.524로 설정하였다. 자연방출 스펙트럼은 유효 위상천이 \mathcal{Q} 에 대하여 주기가 2π 인 함수이므로 유효 위상천이 \mathcal{Q} 를 0부터 2π 까지 $\pi/2$ 만큼씩 변화시키며 소자의 자연방출 스펙트럼을 구하였다. 또한 알짜 이득 계수의 변화에 따른 자연 방출 스펙트럼의 변화를 알아보기 위하여 이득 계수 g 는 문턱 이득 계수 g_{th} 의 0.98인 값과 0.8인 값에서 각각 자연 방출 스펙트럼을 구하였다.

i) 양 끝단면에 모두 무반사 코팅을 한 경우 :

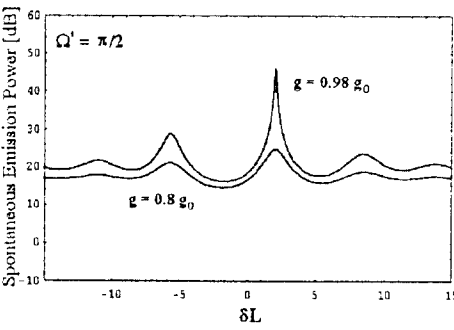
이 경우 위상 천이 조정 DFB 구조 소자의 자연방출 스펙트럼은 p_M 의 식에 $r_1 = r_2 = 0$ 를 대입함으로써 얻어진다. 양 끝단면에 모두 무반사 코팅을 한 경우 index coupling 만을 가지는 경우의 자연방출 스펙트럼을 그림 4에 보였다. 횡축은 Bragg 파장으로 부터의 변이 δ 와 위상 천이 조정 DFB 구조 소자의 길이의 곱으로서 정규화된 주파수를 나타내고 종축은 자연 방출 스펙트럼 파워를 나타내며 단위는 dB이다.

그림 4(a)와 (c)는 유효 위상천이 \mathcal{Q} 가 '0'일때와 유효 위상천이 \mathcal{Q} 가 ' π '인 경우의 자연방출 스펙트럼으로서 식 (24)에서 알수있듯이 Bragg 파장에 대하여 대칭이며, 그림 4(b)와 (d)는 유효 위상천이 $\mathcal{Q} = \pi/2$ 와 $\mathcal{Q} = 3\pi/2$ ($-\pi/2$)인 경우로 Bragg 파장에 대하여 mirror image임을 확인할 수 있다. 특히 그림 4(a)는 $\mathcal{Q} = 0$ 인 경우로서 ($\mathcal{Q} = 0$ 이고

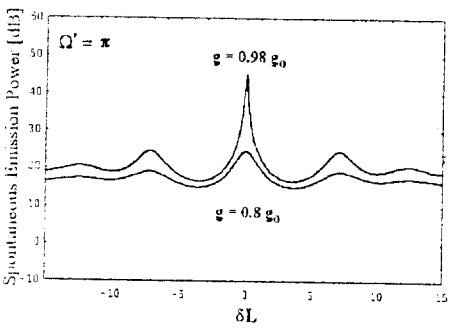
$\phi_1 = \phi_3$ 인 경우를 포함) 단 한개의 구역으로 구성된 DFB 구조 소자와 등가인 소자로 stop band 의 양쪽 끝에서 주 모드의 최대치가 발생함을 볼 수있다. 또한 그림 4 (c) 는 $\Omega' = \pi$ 인 경우로서 ($\Omega = 0$ 이고 $\phi_1 - \phi_3 = \pi$ 인 경우를 포함) 위상 천이 조정 구역이 존재하지 않는 $\lambda/4$ 천이된 DFB 구조 소자와 등가인 소자로서 Bragg 파장에서 주 모드의 최대치가 발생함을 볼 수있다. 따라서 우리가 정의한 유효 위상 천이중 각 활성층 구역에서의 회절 격자의 위상차 $\phi_1 - \phi_3$ 는 위상 천이 조정 구역에서의 위상천이와 등가임을 알 수있다.



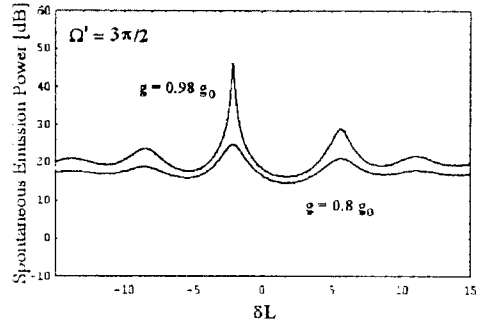
(a)



(b)



(c)

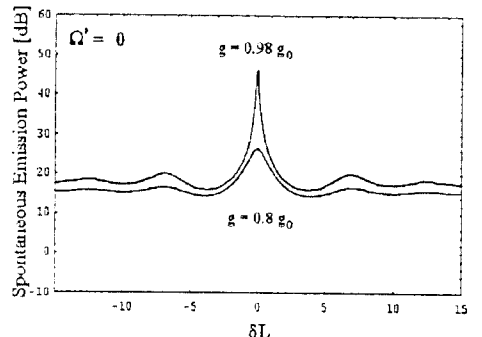


(d)

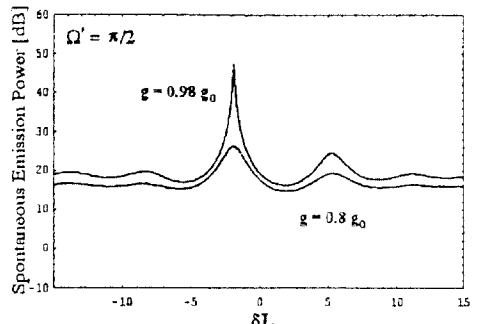
그림 4. 양 단면 모두 무반사 코팅을 하였으며 index coupling 만을 가지는 경우의 위상 천이 조정 DFB 구조 소자의 자연방출 스펙트럼. (a) 유효 위상 천이 $\Omega' = 0$, (b) 유효 위상 천이 $\Omega' = \pi/2$, (c) 유효 위상 천이 $\Omega' = \pi$, (d) 유효 위상 천이 $\Omega' = 3\pi/2$

Fig. 4. Spontaneous emission spectra of a PSC DFB structure device with antireflection coatings on both facets in the case of pure index coupling.

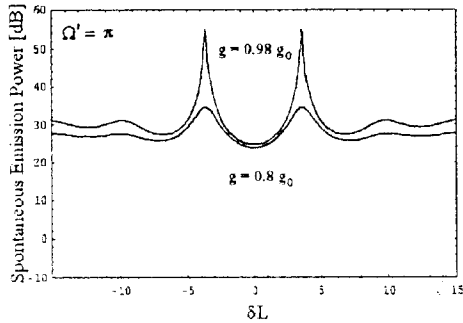
- (a) The effective phase shift $\Omega' = 0$,
- (b) The effective phase shift $\Omega' = \pi/2$,
- (c) The effective phase shift $\Omega' = \pi$,
- (d) The effective phase shift $\Omega' = 3\pi/2$



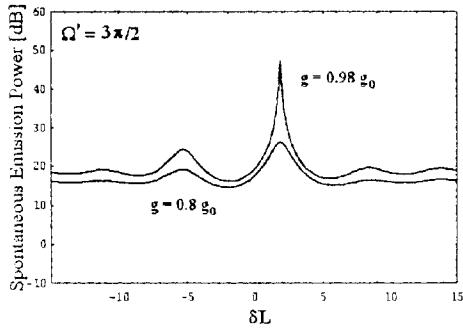
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 5. 양 단면 모두 무반사 코팅을 하였으며 gain coupling 만을 가지는 경우의 위상 천이 조정 DFB 구조 소자의 자연방출 스펙트럼

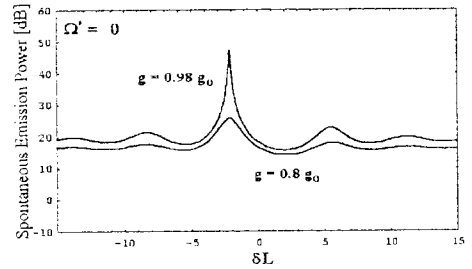
- (a) 유효 위상 천이 $\Omega' = 0$,
- (b) 유효 위상 천이 $\Omega' = \pi/2$,
- (c) 유효 위상 천이 $\Omega' = \pi$,
- (d) 유효 위상 천이 $\Omega' = 3\pi/2$.

Fig. 5. Spontaneous emission spectra of a PSC DFB structure device with antireflection coatings on both facets in the case of pure gain coupling.

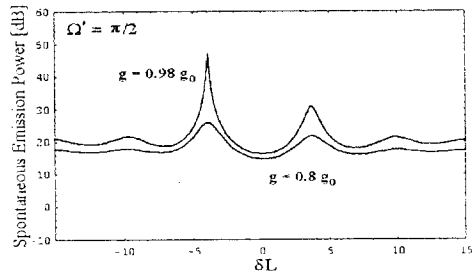
- (a) The effective phase shift $\Omega' = 0$,
- (b) The effective phase shift $\Omega' = \pi/2$,
- (c) The effective phase shift $\Omega' = \pi$,
- (d) The effective phase shift $\Omega' = 3\pi/2$.

그림 5 는 gain coupling 만을 가지는 경우에 유효 위상천이 Ω' 값에 따라 도시한 자연방출 스펙트럼이다. 그림 5 (a) 와 (c)는 유효 위상천이 Ω' 가 '0' 일 때와 유효 위상천이 Ω' 가 ' π ' 인 경우의 자연방출 스펙트럼으로서 식 (25)에서 알수있듯이 Bragg 파장에 대하여 대칭이며, 그림 5 (b) 와 (d)는 유효 위상천이 $\Omega' = \pi/2$ 와 $\Omega' = 3\pi/2 (-\pi/2)$ 인 경우로 Bragg 파장에 대하여 mirror image 임을 확인할 수 있다. 특

히 그림 5 (a) 는 $\Omega' = 0$ 인 경우로서 Bragg 파장에서 주 모드의 최대치가 발생함을 볼 수있으며, 그림 5 (c) 는 $\Omega' = \pi$ 인 경우로서 stop band 의 양쪽 끝에서 주 모드의 최대치가 발생함을 볼수있다. 그림 4 와 그림 5를 비교하면 회절 격자가 gain coupling 만을 가지는 경우가 index coupling 만을 가지는 경우에 비하여 SMSR 이 향상됨을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 6. 양 단면 모두 무반사 코팅을 하였으며 index coupling 과 gain coupling 을 같은 크기로 가지는 경우의 위상 천이 조정 DFB 구조 소자의 자연방출 스펙트럼

- (a) 유효 위상 천이 $\Omega' = 0$,
- (b) 유효 위상 천이 $\Omega' = \pi/2$.

Fig. 6. Spontaneous emission spectra of a PSC DFB structure device with antireflection coatings on both facets in the case of the same magnitude of index coupling and gain coupling.

- (a) The effective phase shift $\Omega' = 0$,
- (b) The effective phase shift $\Omega' = \pi/2$.

그림 6 은 index coupling 의 크기와 gain coupling 의 크기가 같은 complex coupled 회절 격자를 양 활성층이 가지는 경우에 유효 위상천이 Ω' 값에 따라 도시한 자연방출 스펙트럼이다. 이때 자연방출 스펙트럼은 식 (23) 에서 알수있듯이 index coupling

만을 가지는 경우나 gain coupling 만을 가지는 경우와는 달리 Bragg 파장에 대하여 대칭 또는 mirror image 를 갖는 자연방출 스펙트럼이 존재하지 않음을 알수있다. 즉 어떠한 경우에도 주모드의 이중성 (mode degeneracy) 가 발생하지 않음을 알수있다.

ii) 한 단면은 무반사 코팅을 하고 다른 단면은 절개면을 가지는 경우 :

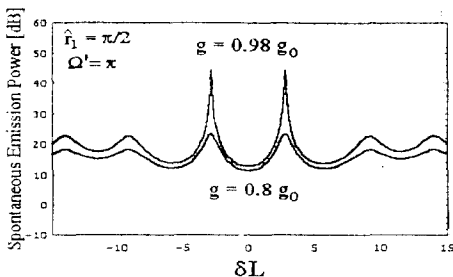
a) 입력단면은 절개면을 가지고 출력단면은 무반사 코팅을 한 경우 ($r_1 = r, r_2 = 0$)

Index coupling 만이 존재하는 경우에 단면 반사 계수의 위상과 유효 위상 천이가 자연방출 스펙트럼에 미치는 영향을 나타내는 식 (24)는 다음과 같이 표현된다.

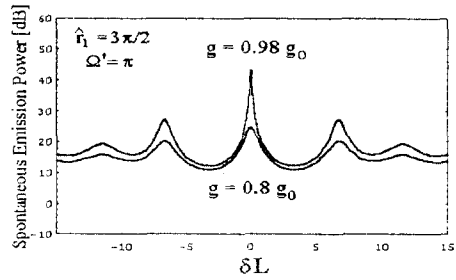
$$p_{NL}(L, \delta, \hat{r}_1, x, \Omega') = p_{NL}(L, -\delta, -\hat{r}_1^*, x, -\Omega') \quad (26)$$

\hat{r}_1 의 위상과 유효 위상천이 Ω' 이 자연방출 스펙트럼에 주는 변화를 알아보기 위하여 각각 $\pi/2$ 만큼 변화시켜 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하여야 할 경우의 수는 16 가지이나 자연방출 스펙트럼이 Bragg 파장에 대하여 mirror image 의 관계를 가지는 경우가 존재하기 때문에 독립적인 경우의 수는 10 가지로 줄게된다. 또한 10 가지 독립적인 경우중 $\hat{r}_1 = -\hat{r}_1^*$ 이고 $\Omega' = -\Omega'$ 인 4가지의 경우에는 자연방출 스펙트럼은 Bragg 파장에 대하여 대칭이다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 위의 관계를 확인하였으며, 10 가지 독립적인 경우중 대표적인 2 경우를 그림 7 에 보인다.

그림 7 의 (a) 와 (b) 는 각각 유효 위상 천이 Ω' 이 π 인 경우 \hat{r}_1 의 위상이 $\pi/2$ 와 $3\pi/2$ 인 경우로서 식 (26) 에서 알수있듯이 Bragg 파장에 대하여 대칭이다.



(a)



(b)

그림 7. 한 단면은 절개면 다른 단면은 무반사 코팅을 한 경우 회절격자가 index coupling만을 가진 경우에 여러가지 \hat{r}_1 과 Ω' 의 위상값에 대한 위상 천이 조정 DFB 구조소자의 자연방출 스펙트럼.

(a) \hat{r}_1 의 위상 = $\pi/2$, 유효 위상 천이 $\Omega' = \pi$,

(b) \hat{r}_1 의 위상 = $3\pi/2$, 유효 위상 천이 $\Omega' = \pi$

Fig. 7. Spontaneous emission spectra of a PSC DFB structure device with antireflection coating on one facet and the other cleaved facet for various phases of \hat{r}_1 and Ω' in the case of pure index coupling.

(a) The phase of $\hat{r}_1 = \pi/2$, effective phase shift $\Omega' = \pi$, (b) The phase of $\hat{r}_1 = 3\pi/2$, effective phase shift $\Omega' = \pi$.

Gain coupling 만이 존재하는 경우에 단면 반사 계수의 위상과 유효 위상 천이가 자연방출 스펙트럼에 미치는 영향을 나타내는 식 (25) 은 다음과 같이 표현된다.

$$p_{NL}(L, \delta, \hat{r}_1, -if, \Omega') = p_{NL}(L, -\delta, \hat{r}_1^*, -if, -\Omega') \quad (27)$$

Gain coupling 만을 가지는 경우도 Index coupling 만을 가지는 경우와 마찬가지로 \hat{r}_1 의 위상과 유효 위상천이 Ω' 의 위상을 $\pi/2$ 만큼 변화시켜 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 이 경우 시뮬레이션을 수행할 경우의 수는 16 가지이나 식(27)에서 보는 것처럼 \hat{r}_1 의 위상과 Ω' 의 값에 따라 Bragg 파장에 대한 mirror image 의 관계를 가지는 경우가 존재하기 때문에 독립적인 경우의 수는 10 가지가 존재하게 된다. 또한 10 가지 독립적인 경우중 $\hat{r}_1 = \hat{r}_1^*$ 이고 $\Omega' = -\Omega'$ 인 네가지의 경우에 자연방출 스펙트럼은 Bragg 파장에 대하여 대칭이다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 위의 관계를 확인하였으며, 10 가지 경우중 대

표적인 2 경우를 그림 8 에 보인다.

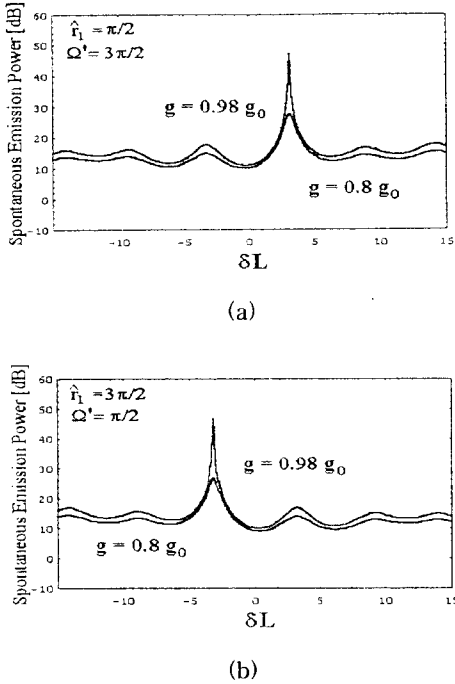


그림 8. 한 단면은 절개면 다른 단면은 무반사 코팅을 한 경우 회절격자가 gain coupling만을 가진 경우에 여러가지 \hat{r}_1 과 Ω' 의 위상값에 대한 위상 천이 조정 DFB 구조소자의 자연방출 스펙트럼
 (a) \hat{r}_1 의 위상 = $\pi/2$, 유효 위상 천이 $\Omega' = 3\pi/2$, (b) \hat{r}_1 의 위상 = $3\pi/2$, 유효 위상 천이 $\Omega' = \pi/2$

Fig. 8. Spontaneous emission spectra of a PSC DFB structure device with antireflection coating on one facet and the other cleaved facet for various phases of \hat{r}_1 and Ω' in the case of pure gain coupling.
 (a) The phase of $\hat{r}_1 = \pi/2$, effective phase shift $\Omega' = 3\pi/2$, (b) The phase of $\hat{r}_1 = 3\pi/2$, effective phase shift $\Omega' = \pi/2$.

그림 8 의 (a) 와 (b) 는 각각 \hat{r}_1 의 위상이 $\pi/2$ 이며 유효 위상 천이 Ω' 이 $3\pi/2$ 인 경우와 \hat{r}_1 의 위상이 $3\pi/2$ 이며 유효 위상 천이 Ω' 이 $\pi/2$ 인 경우로서 식 (27) 에서 알수있듯이 Bragg 파장에 대하여 mirror image 의 관계를 가진다.

b) 입력 단면은 무반사 코팅을 하고 출력단면은 절개면을 가지는 경우 ($r_1 = 0, r_2 = r$) :

이 경우 자연방출 스펙트럼 식은 입력 단면은 절개면을 가지며 출력 단면은 무반사 코팅을 한 a) 의 경우와 같은 형태의 자연방출 스펙트럼식을 가지며 특히 $\phi_1 = -\phi_3 - 2\beta_0 L$ 인 경우 두 식은 동일한 식이 된다. 그 이유는 물리적으로 가역정리가 성립하기 때문이다.

iii) 양 끝단면이 모두 절개면을 가지는 경우;

회절 격자가 complex coupling 을 가지는 경우, index coupling 만을 가지는 경우와 gain coupling 만을 가지는 경우 각각에 대하여 단면 반사 계수의 위상과 유효 위상 천이의 값이 자연방출 스펙트럼에 미치는 영향을 나타내는 관계식은 각각 (23), (24) 와 (25) 식으로 주어진다. 따라서 complex coupling 만을 가지 경우는 같은 소자내에서는 Bragg 파장에 대하여 mirror image 관계를 가지는 자연방출 스펙트럼이 존재하지 않는다.

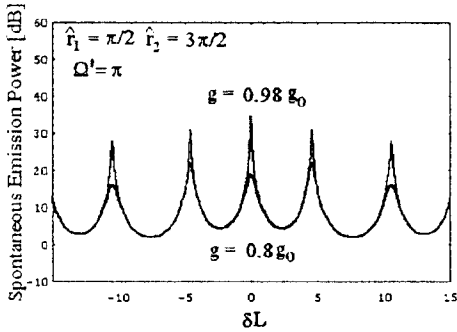
Index coupling 만을 가지는 경우에 \hat{r}_1 과 \hat{r}_2 의 위상과 Ω' 의 값을 $\pi/2$ 씩 변화시키며 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 이 경우 시뮬레이션을 수행하여야 할 경우의 수는 64 가지이나 식 (24)에서 불수있는 것처럼 \hat{r}_1 과 \hat{r}_2 의 위상과 Ω' 의 값에 따라 자연방출 스펙트럼이 Bragg 파장에 대하여 mirror image의 관계를 가지는 경우가 존재하기 때문에 독립적인 경우의 수는 36 가지로 줄게된다. 특히 $\hat{r}_1 = -\hat{r}_1^*, \hat{r}_2 = -\hat{r}_2^*$ 이고 $\Omega' = -\Omega'$ 인 8 가지 경우에는 자연방출 스펙트럼이 Bragg 파장에 대하여 대칭이다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 위의 관계들을 확인하였으며, 36 가지 경우 중 대표적인 4 경우를 그림 9 에 보인다.

그림 9 (a) 와 (c)는 식 (24)에서 알수있듯이 Bragg 파장에 대하여 대칭이며, 그림 9 (b) 와 (d)는 Bragg 파장에 대하여 mirror image 임을 확인할 수 있다. 그리고 양 단면이 절개면을 가지는 경우의 자연 방출 스펙트럼은 양 단면이 무반사 코팅을 한 경우와는 달리 단면 반사 계수의 위상과 유효 위상천이의 값에 따라 크게 달라지며, Fabry-Perot(FP) 모드의 영향을 받는 것을 알수있다.

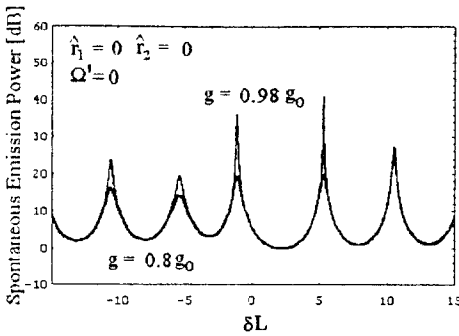
Gain coupling 만을 가지는 경우도 index coupling 만을 가지는 경우와 마찬가지로 \hat{r}_1 과 \hat{r}_2 의 위상과 Ω' 의 값을 $\pi/2$ 씩 변화시키며 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였고 식 (25) 에서 보는 것처럼 mirror image 의 관계를 가지는 경우가 존재하기 때문에 독립적인 경우의 수는 36 가지로 줄게 된다. 또한 $\hat{r}_1 = \hat{r}_1^*,$

$\hat{r}_2 = \hat{r}_2^*$ 이고 $\Omega = -\Omega'$ 인 8 가지의 경우에는 자연 방출 스펙트럼이 Bragg 파장에 대하여 대칭이다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 위의 관계들을 확인하였으며, 36 가지 경우 중 대표적인 4 경우를 그림 10 에 보인다.

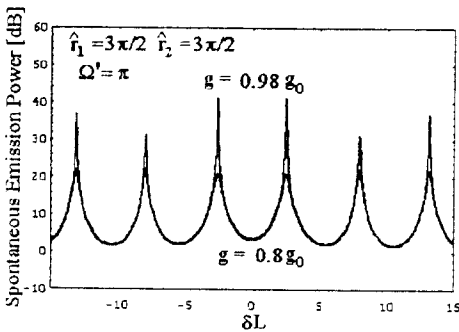
그림 10 (a) 와 (c)는 식 (25)에서 알수있듯이 Bragg 파장에 대하여 대칭이며, 그림 10 (b) 와 (d)는 Bragg 파장에 대하여 mirror image 임을 확인할 수 있었다. Index coupling 만을 가지는 경우의 자연 방출 스펙트럼인 그림 10 과 비교하였을때 gain coupling 만을 가지는 경우가 일반적으로 SMSR이 향상됨을 볼수있었고 \hat{r}_1 과 \hat{r}_2 의 위상 및 Ω' 값의 변화의 영향을 작게 받음을 알 수있었다.



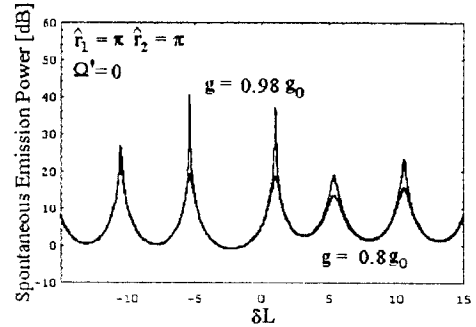
(a)



(b)



(c)

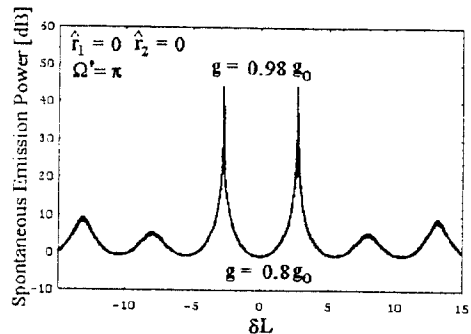


(d)

그림 9. 양 단면이 절개면을 가지며 회절격자가 index coupling만을 가진 경우에 \hat{r}_1 과 \hat{r}_2 그리고 Ω' 위상에 따른 위상 천이 조정 DFB 구조 소자의 자연방출 스펙트럼
(a) \hat{r}_1 의 위상= $\pi/2$, \hat{r}_2 의 위상= $3\pi/2$, 유효 위상 천이 $\Omega'=\pi$, (b) \hat{r}_1 의 위상=0, \hat{r}_2 의 위상=0, 유효 위상 천이 $\Omega' = 0$, (c) \hat{r}_1 의 위상= $3\pi/2$, \hat{r}_2 의 위상= $3\pi/2$, 유효 위상 천이 $\Omega'=\pi$, (d) \hat{r}_1 의 위상= π , \hat{r}_2 의 위상= π , 유효 위상 천이 $\Omega'=0$

Fig. 9. Spontaneous emission spectra of a PSC DFB structure device with both cleaved facets for various phases of \hat{r}_1 , \hat{r}_2 and Ω' in the case of pure index coupling.

- (a) The phase of $\hat{r}_1=\pi/2$, The phase of $\hat{r}_2=3\pi/2$, effective phase shift $\Omega'=\pi$,
- (b) The phase of $\hat{r}_1=0$, The phase of $\hat{r}_2=0$, effective phase shift $\Omega'=0$,
- (c) The phase of $\hat{r}_1=3\pi/2$, The phase of $\hat{r}_2=3\pi/2$, effective phase shift $\Omega'=\pi$,
- (d) The phase of $\hat{r}_1=\pi$, The phase of $\hat{r}_2=\pi$, effective phase shift $\Omega'=0$.



(a)

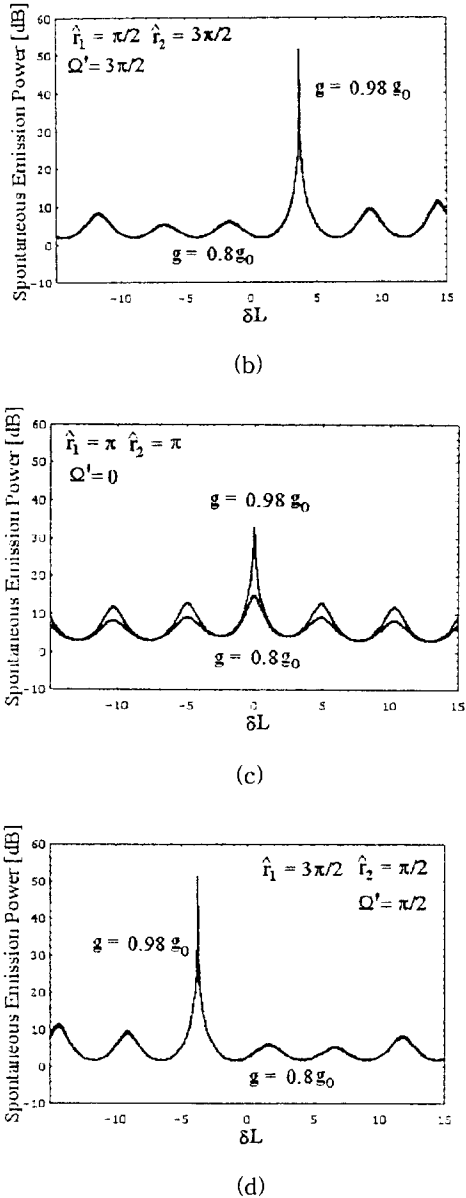


그림 10. 양 단면이 절개면을 가지며 회절격자가 gain coupling만을 가진 경우에 \hat{r}_1 과 \hat{r}_2 그리고 \mathcal{Q}' 위상에 따른 위상 천이 조정 DFB 구조 소자의 자연방출 스펙트럼

- (a) \hat{r}_1 의 위상=0, \hat{r}_2 의 위상=0, 유효 위상 천이 $\mathcal{Q}'=\pi$, (b) \hat{r}_1 의 위상= $\pi/2$, \hat{r}_2 의 위상= $3\pi/2$, 유효 위상 천이 $\mathcal{Q}'=3\pi/2$, (c) \hat{r}_1 의 위상= π , \hat{r}_2 의 위상= π , 유효 위상 천이 $\mathcal{Q}'=0$, (d) \hat{r}_1 의 위상= $3\pi/2$, \hat{r}_2 의 위상= $\pi/2$, 유효 위상 천이 $\mathcal{Q}'=\pi/2$

Fig. 10. Spontaneous emission spectra of a PSC DFB structure device with both cleaved facets for various phases of \hat{r}_1 , \hat{r}_2 and \mathcal{Q}' in the case of pure gain coupling.

- (a) The phase of $\hat{r}_1=0$, The phase of $\hat{r}_2=0$, effective phase shift $\mathcal{Q}'=\pi$,
 (b) The phase of $\hat{r}_1=\pi/2$, The phase of $\hat{r}_2=3\pi/2$, effective phase shift $\mathcal{Q}'=3\pi/2$,
 (c) The phase of $\hat{r}_1=\pi$, The phase of $\hat{r}_2=\pi$, effective phase shift $\mathcal{Q}'=0$,
 (d) The phase of $\hat{r}_1=3\pi/2$, The phase of $\hat{r}_2=\pi/2$, effective phase shift $\mathcal{Q}'=\pi/2$.

V. 결론

양 단면의 반사, index coupling 및 gain coupling 을 동시에 고려할수있는 complex coupled 회절격자와 각 구역의 회절 격자의 위상이 독립적으로 고려된 다중 구역 DFB 구조 소자의 자연 방출 스펙트럼에 관한 analytic 식을 결합 모드 방정식의 해에 전달 행렬과 다중 반사 방법을 사용하여 유도하였다.

유도된 자연방출 스펙트럼식을 이용하여 파장 가변 레이저 및 필터로 사용되어지고 있는 위상 천이 조정 DFB 구조 소자의 자연방출 스펙트럼에 관한 analytic 식을 유도하였다. 유도된 자연방출 스펙트럼의 식에 위상 천이 조정 구역에서의 위상 천이와 각 회절 격자의 위상 차이의 합으로 표현되는 유효 위상 천이 파라메타를 도입하여 자연방출 스펙트럼식에 포함되는 파라메타들의 수를 줄일수있었다. 또한 중요 파라메타들이 자연 방출 스펙트럼 및 동작 특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 중요 파라메타들과 자연방출 스펙트럼과의 관계를 나타내는 식을 구하였다. 위상 천이 조정 DFB 구조 소자의 자연방출 스펙트럼은 유효 위상 천이가 '0' 이면 단일구조 DFB 구조소자와, 유효 위상 천이가 ' π ' 이면 $\lambda/4$ 위상 천이 DFB 구조 소자의 자연 방출 스펙트럼과 같아지므로 유효 위상 천이중 각 회절 격자의 위상차의 기여분은 위상 천이 조정 구역의 위상 천이와 등가임을 확인하였다.

컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 자연 방출 스펙트럼과 중요 파라메타들간의 관계를 확인하였고 자연 방출 스펙트럼으로부터 중요 파라메타들의 값을 추정할 수 있는 가능성을 확인하였다. 위상 천이 조정 DFB구조 소

자의 회절 격자의 coupling mechanism 이 gain coupling만을 가지는 경우가 index coupling만을 가지는 경우에 비하여 SMSR 이 향상됨을 확인할 수 있었고 자연방출 스펙트럼이 중요 파라메타 값들의 변화에 영향을 적게 받음을 확인할 수 있었다. 또한 한 단면 절개면 다른 단면은 무반사 코팅, 양 단면 모두 절개면을 가지는 경우는 구조 소자의 자연 방출 스펙트럼이 단면 반사 계수의 위상에 따라 크게 달라지며 또한 Fabry-Perot(FP) 모드의 영향을 받음을 볼 수 있었다.

<Appendix>

$$\begin{aligned} \chi_{23} = & \frac{g_a \{ \exp(2S_{ar}L_a) - 1 \}}{4 |S_a^2|^2 S_{ar} (1 - |\hat{r}_1|^2)} \cdot \\ & \{ |A(S_a - \delta_a'') + ix_a' B \exp(-iQ')|^2 \\ & + |B(S_a + \delta_a'') \exp(-iQ') - ix_a' A|^2 \} \\ & + \frac{g_a (1 - \exp(-2S_{ar}L_a))}{4 |S_a^2|^2 S_{ar} (1 - |\hat{r}_1|^2)} \cdot \\ & \{ |A(S_a + \delta_a'') - ix_a' B \exp(-iQ')|^2 \\ & + |B(S_a - \delta_a'') \exp(-iQ') + ix_a' A|^2 \} \\ & + \frac{2g_a}{4 |S_a^2|^2 S_{ar} (1 - |\hat{r}_1|^2)} Im \\ & [\{ |A|^2 (S_a - \delta_a'') (S_a + \delta_a'')^* \\ & - |B x_a'|^2 - |A x_a'|^2 + |B|^2 (S_a + \delta_a'') (S_a - \delta_a'')^* \\ & - \exp(iQ') A B^* \{ (ix_a')^* (S_a - \delta_a'') \\ & - (-ix_a') (S_a - \delta_a'')^* \} \\ & + \exp(-iQ') A^* B \{ (ix_a') (S_a + \delta_a'')^* \\ & - (-ix_a')^* (S_a + \delta_a'') \} \{ \exp(2iS_{ar}L_a) - 1 \}] \end{aligned}$$

여기서

$$\begin{aligned} A = & \hat{r}_1 ix' \sinh(S_a L_a) + \{ S_a \cosh(S_a L_a) \\ & + i\delta' \sinh(S_a L_a) \} \\ B = & -ix' \sinh(S_a L_a) + \hat{r}_1 \{ S_a \cosh(S_a L_a) \\ & - i\delta' \sinh(S_a L_a) \} \end{aligned}$$

※ 본 연구는 한국통신 연구개발원 장기 기초 연구사업과 서울대학교 반도체 공동연구소의 교육부 반도체 분야 학술연구 조성비 (과제번호 : ISRC 95-E-3205)에 의해 수행하였습니다.

참 고 문 헌

- [1] G. P. Agrawal and N. K. Dutta, *Semiconductor Lasers*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1993.
- [2] G. Griffel, R. J. Lang, and M. Ikeda, "Two-Section Gain-Levered Tunable Distributed Feedback Laser with Active Tuning Section," *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol. QE-30, No.1, pp.15 - 18, 1994.
- [3] J. E. A. Whietaway, B. Garrett, G. H. B. Thompson, A. J. Collar, C. J. Armistead, and M. J. Fice "The static and dynamic characteristics of single and multiple phase-shifted DFB laser structures," *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol. QE-28, No.5, pp.1127 - 1293, 1992.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] J. Zoz, T. W. Johannes, A. Rast, B. Borchert, U. Barabars, and W. Harth, "Dynamics and stability of Complex-Coupled DFB Lasers with Absorptive Grating," *IEEE J. Quantum Electron* Vol. 31, No. 8, pp.1432 - 1442, 1995.
- [8] 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.
- [9] 김 부균, 최 지연, 정 기석, 조 성찬, 이 봉영, "DFB 구조 소자의 자연 방출 스펙트럼에 관한 이론적 해석," 전자 공학회, 32 권, A, 3 호, pp 45 - 57, 1995
- [10] 김 부균, 정 기석, 이 봉영, "Phase-shift-con-

trolled DFB 파장 가변 필터의 투과 증폭 스펙

트럼에 관한 이론적 해석," 전자 공학회 심사중

저 자 소 개

丁 基 碩(正會員)

1970년 12월 1일생. 1994년 2월 숭실대학교 전자공학과 공학사. 1996년 2월 숭실대학교 전자공학과 공학석사. 1996년 2월 ~ 현재 대한전선 정보통신 연구소 연구원. 주관심분야는 광소자, 광통신시스템, 광전송장치 등임

金 富 均(正會員)

1979년 2월 서울대학교 전자공학과 공학사. 1981년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 고학석사. 1989년 8월 University of Southern California 공학박사. 1993년 6월 ~ 8월 IBM Almaden 연구소 방문 연구원 1981년 3월 ~ 현재 숭실대학교 전자공학과 부교수. 주관심분야는 광소자, 광통신시스템, 광정보장치 등임

李 奉 永(正會員)

1957년 4월 20일생. 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 한국통신연구개발단 선임연구원. 주관심분야는 High-Speed/Wide-band Optical Trnasmision System 등임