

1.55 μm DFB 레이저의 특성에 미치는 Grating 구조와 Mirror 위치의 영향

(Effect of Grating Structures and Mirror Positions on Characteristics of 1.55 μm DFB Lasers)

權 奇 英 *

(Kee Young Kwon)

要 約

AR coating을 하지않은 두 개의 mirror를 갖는 1.55 μm DFB 레이저에서, index grating과 gain grating이 공존하는 경우 두 grating의 구조와 배치방법에 따른, 발진 주파수와 발진이득 그리고 longitudinal direction으로의 beam profile 등의 특성 변화를 이론적으로 해석함으로써, mirror의 위치에 관계없이 좋은 정적 특성을 갖는 LD를 얻을 수 있는 최적구조를 얻었으며, 이는 index grating과 gain grating의 위상 차이를 $\Delta\varnothing = 3\pi/4$ 로 하고, $(\kappa L)_i = 0.9$ 일 경우는 $(\kappa L)_r = 4\sim 6$ 으로, $(\kappa L)_i = 0.7$ 일 때는 $(\kappa L)_r = 3\sim 5$ 로 하는 것이다. 이 경우 $\Delta\varnothing = 0$ 인 gain-coupled DFB 레이저 보다 2~2.5 배 향상된 안정성을 갖는다. $\Delta\varnothing = 0$ 인 gain-coupled DFB 레이저가 $\Delta\varnothing = \pi$ 인 loss-coupled DFB 레이저보다 10^{10} 배 이상 더 좋은 특성을 갖는다.

Abstract

In 1.55 μm DFB lasers with two non-AR mirrors, I have analyzed the effect of the structures of index and/or gain gratings and mirror positions on the threshold gains, the lasing frequencies, and the beam profiles in longitudinal direction of lasers. I have obtained the optimum condition of static characteristics that $\Delta\varnothing$ (the phase difference between index grating and gain grating is $3\pi/4$, $(\kappa L)_r = 4\sim 6$ in case of $(\kappa L)_i = 0.9$ and $(\kappa L)_r = 3\sim 5$ in case of $(\kappa L)_i = 0.7$ The modal selectivity and intensity uniformity of this optimum condition are 2~2.5 times better than those of the gain-coupled DFB lasers ($\Delta\varnothing = 0$). The gain-coupled DFB lasers($\Delta\varnothing = 0$) have 10^{10} times better modal selectivity and intensity uniformity than the loss-coupled DFB lasers($\Delta\varnothing = \pi$).

* 正會員, 公州大學校 工科大學 電子工學科
(Dept. of Electron. Eng., College of Eng.,
Kongju Na'l Univ.)

※ 본 논문은 1993년 HAN-BISDN 연구과제로서
한국 전자 통신연구소의 후원으로 이루어 졌음.
接受日字 : 1993年 5月 18日

I. 서론

광대역 광통신 시스템에 소요되는 광원이 갖추어야 하는 중요한 특성은, 좁은 대역폭의 단일 파장을 갖는 단일모드 동작을 하여야 하며^[1], 고주파로 전류 변조를 시키더라도 발진 파장의 특성에 변화가 적어야 한다는 것이다.^[2] 이러한 특성을 만족시키는 레이저 다이오드 구조로 Bragg scattering을 이용한 DFB(Distributed Feedback) 레이저 다이오드가 각광을 받고 있으나, index-coupled DFB 레이저의 경우 발진파장의 degeneracy^[3]와 mirror면의 반사율과 위상에 민감한 발진특성이^{[4],[5]} 문제가 된다. 이를 개선하기 위하여 AR-coated λ/4 phase-shifted DFB LD가 제안되었지만, 낮은 residual reflectivity (< 0.005)를 요구하는 점^[6]과 spatial hole burning 현상이 심한 것^[7]이 문제가 되었다. 최근에 제안된 다른 방법의 laser는 phase-shift가 없는 gain/loss coupled DFB laser이며, 발진이득의 차이와 spatial hole burning 현상 등에서 향상된 특성을 보이고, feedback에도 덜 민감한 특성을 보여준다.^{[8],[9]}

본 논문은 AR coating을 하지않은 두 개의 mirror를 갖는 1.55μm DFB laser에서, index grating과 gain grating이 공존하는 경우 두 grating의 구조와 배치방법에 따른, 발진 주파수와 발진이득 그리고 longitudinal direction으로의 beam profile 등의 특성 변화를 이론적으로 해석함으로써, mirror의 위치변화에도 불구하고 LD의 동작특성이 우수하도록, grating의 구조를 최적화하고자 하는 것이 목적이다. 제 II장에서 이론적 배경을 설명하고, 제 III장에서는 index 및 gain grating이 mirror의 위치변화에 따라 LD의 동작특성에 어떠한 영향을 주는지 이론적 해석결과를 바탕으로 검토하고, 마지막으로 결론을 내렸다.

II. 이론

1. 발진 모드와 발진 이득

Refractive index grating과 gain grating이 주는 효과를 모두 고려하기 위하여, 다음 식과 같이 refractive index 및 gain의 변화를 표현할 수 있다.

$$n(z) = n + (\Delta n)\cos(2\pi z / \Lambda + \Omega) \quad (1)$$

$$\alpha(z) = \alpha + (\Delta\alpha)\cos(2\pi z / \Lambda + \Omega + \Delta\Omega) \quad (2)$$

여기서 n(z)는 refractive index이고, α(z)는 gain이다. z는 longitudinal direction으로의 좌표

값으로, 좌측 mirror는 z = -L'/2에 위치하고, 우측 mirror는 z = L''/2에 위치한다. Δ와 Ω는 각각 refractive index grating과 gain grating의 주기 및 위상이고, ΔΩ는 refractive index grating과 gain grating의 위상차이를 나타낸다.

만족시켜야 하는 파동 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla^2 E(z,t) + k^2(z)E(z,t) = 0 \quad (3)$$

식(3)의 해는 E(z,t) = E(z)e^{im}의 형태로 나타낼 수 있으며, k²(z)는 Δn << n, α << β 그리고 Δα << β 라는 가정하에 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$k^2(z) = \beta^2 + 2i\alpha\beta + 4k\beta\cos(2\beta_0 z + \Omega) - 2i(\Delta\alpha)\beta\sin(2\beta_0 z + \Omega)\sin(\Delta\Omega) \quad (4)$$

여기서

$$\beta_0 = \pi / \Lambda \quad (5)$$

$$\beta = n\omega / c \quad (6)$$

$$k = \left(\frac{\beta}{2}\right)\left(\frac{\Delta n}{n}\right) + i\frac{\Delta\alpha}{2}\cos(\Delta\Omega) \quad (7)$$

식 (4)의 α는 레이저 발진을 위한 문턱에서의 net gain이며, 식 (6)의 발진주파수 ω는 β를 알면 구할 수 있다.

일반성을 잃지 않고 E(z)를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$E(z) = R(z)e^{-i\beta_0 z} + S(z)e^{i\beta_0 z} \quad (8)$$

여기서 R(z)는 z의 양의 방향으로 전파하는 wave이고 S(z)는 z의 음의 방향으로 전파하는 wave이다. R''(z) << β₀R'(z)와 S''(z) << β₀S'(z)를 가정하여서, R(z)와 S(z)가 천천히 변화하는 wave라고 하면 (8)식과 (3)식으로 부터 다음 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} &[-2i\beta_0 R' - \beta_0^2 R + (\beta^2 + 2i\alpha\beta)R]e^{-i\beta_0 z} \\ &+ [2i\beta_0 S' - \beta_0^2 S + (\beta^2 + 2i\alpha\beta)S]e^{i\beta_0 z} \\ &+ 2k\beta(e^{i2\beta_0 z} e^{i\Omega} + e^{-i2\beta_0 z} e^{-i\Omega})(Re^{-i\beta_0 z} + Se^{i\beta_0 z}) \\ &- (\Delta\alpha)\beta\sin(\Delta\Omega)(e^{i2\beta_0 z} e^{i\Omega} - e^{-i2\beta_0 z} e^{-i\Omega})(Re^{-i\beta_0 z} + Se^{i\beta_0 z}) = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

식 (9)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$-R' + (\alpha - i\delta)R = i\kappa' e^{-i\Omega} S \quad (10)$$

$$S' + (\alpha - i\delta)S = i\kappa'' e^{i\Omega} R \quad (11)$$

여기서

$$\delta = \beta - \beta_0 \tag{12}$$

$$\kappa' = \kappa + \frac{\Delta\alpha}{2} \sin(\Delta\Omega) \tag{13}$$

$$\kappa'' = \kappa - \frac{\Delta\alpha}{2} \sin(\Delta\Omega) \tag{14}$$

이고, $|\delta| \ll \beta$ 를 가정하였으며, $e^{\pm i3\beta_0 z}$ 로 전파되는 wave는 생략하였다.

(10) (11)식은 다음과 같은 형태의 해를 갖는다.

$$R(z) = r_1 e^{\gamma z} + r_2 e^{-\gamma z} \tag{15}$$

$$S(z) = s_1 e^{\gamma z} + s_2 e^{-\gamma z} \tag{16}$$

여기서 r_1, r_2, s_1 과 s_2 는 상수이다.

식 (10), (11)에 식 (15), (16)를 대입하면 다음 식을 얻는다.

$$\hat{\Gamma} r_1 = i\kappa' e^{-i\Omega} s_1 \tag{17}$$

$$\Gamma r_2 = i\kappa' e^{-i\Omega} s_2 \tag{18}$$

$$\Gamma s_1 = i\kappa'' e^{i\Omega} r_1 \tag{19}$$

$$\hat{\Gamma} s_2 = i\kappa'' e^{i\Omega} r_2 \tag{20}$$

여기서

$$\hat{\Gamma} = -\gamma + \alpha - i\delta \tag{21}$$

$$\Gamma = \gamma + \alpha - i\delta \tag{22}$$

(17), (18), (19), (20) 식은 다음 식이 만족될 때 해를 갖는다.

$$\gamma^2 = (\alpha - i\delta)^2 + \kappa' \kappa'' \tag{23}$$

식 (15), (16)으로 표시되는 R(z)와 S(z)는, 왼쪽 mirror가 위치하는 $z = -\frac{L}{2}$ 과 오른쪽 mirror가 위치하는 $z = \frac{L}{2}$ 에서 다음의 경계 조건을 만족해야 한다.

$$(r_1 e^{-\gamma L/2} + r_2 e^{\gamma L/2}) e^{i\beta_0 L/2} = \hat{\rho}_l (s_1 e^{-\gamma L/2} + s_2 e^{\gamma L/2}) e^{-i\beta_0 L/2} \tag{24}$$

$$(s_1 e^{\gamma L/2} + s_2 e^{-\gamma L/2}) e^{i\beta_0 L/2} = \hat{\rho}_r (r_1 e^{\gamma L/2} + r_2 e^{-\gamma L/2}) e^{-i\beta_0 L/2} \tag{25}$$

β_l 과 β_r 은 각각 왼쪽과 오른쪽 mirror에서의 E field의 반사계수이다. 식 (17), (20), (24), (25)로 부터 다음 식이 유도된다

$$\frac{e^{-\gamma(L+L'')/2} \left(1 - \rho_l \frac{\hat{\Gamma}}{i\kappa'}\right)}{\left(\rho_l - \frac{\hat{\Gamma}}{i\kappa''}\right)} = \frac{e^{\gamma(L'+L'')/2} \left(\rho_r - \frac{\hat{\Gamma}}{i\kappa''}\right)}{\left(1 - \rho_r - \frac{\hat{\Gamma}}{i\kappa''}\right)} \tag{26}$$

여기서

$$\rho_l = \hat{\rho}_l e^{-i\beta_0 L'} e^{i\Omega} \tag{27}$$

$$\rho_r = \hat{\rho}_r e^{-i\beta_0 L''} e^{-i\Omega} \tag{28}$$

식 (17), (19), (21), (22)로 부터 다음 식이 유도된다.

$$\gamma = \frac{-i\kappa' \left(\frac{\hat{\Gamma}}{i\kappa'} - \frac{i\kappa''}{\Gamma}\right)}{2} \tag{29}$$

상기 식 (26)과 식 (29)로 부터, 최종적으로 다음과 같은 eigenvalue equation을 얻는다.

$$\gamma L = \frac{-i\kappa' L \sinh(\gamma L)}{D} \times \left\{ \left[\left(\frac{\kappa''}{\kappa'} \rho_l + \rho_r \right) (1 - \rho^2) \cosh(\gamma L) \pm (1 + \rho^2) \left[\left(\frac{\kappa''}{\kappa'} \rho_l - \rho_r \right) \sinh^2(\gamma L) + \frac{\kappa''}{\kappa'} (1 - \rho^2)^2 \right]^{1/2} \right] \right\} \tag{30}$$

여기서

$$D = (1 + \rho^2)^2 - 4\rho^2 \cosh^2(\gamma L) \tag{31}$$

$$\rho^2 = \rho_l \rho_r = \hat{\rho}_l \hat{\rho}_r e^{-i2\beta_0 L} \tag{32}$$

$$L = (L' + L'') / 2 \tag{33}$$

식 (30)에서 γ 를 구할 수 있으며, 이로 부터 threshold에서의 gain α 와 δ 를 구하고, δ 로 부터 발진주파수 $\omega = \frac{c\beta}{n} = \frac{c\beta}{n} (\beta_0 + \delta)$ 를 구할 수 있다.

2. 모드의 field profile

다음으로 longitudinal direction으로의 beam profile 변화를 살펴보기 위하여 다음과 같은 계산을 하였다.

식 (15)와 (16)의 R(z), S(z) 표현식에서 r_1, r_2, s_1 및 s_2 의 절대치는 알 수 없으나 상대적인 크기는 알 수 있다.

식 (17)로 부터

$$r_1 = (i\kappa' e^{-i\Omega} / \hat{\Gamma}) s_1 \tag{34}$$

식 (24), (20), (17)로 부터

$$r_2 = \frac{\left(\frac{\kappa''}{\kappa'} - \rho_l \frac{\hat{\Gamma}}{i\kappa''}\right)}{\left(\rho_l - \frac{\hat{\Gamma}}{i\kappa''}\right)} e^{-i\Omega} e^{-\gamma L} s_1 \tag{35}$$

식 (20), (35)로 부터

$$s_2 = \frac{i\kappa'' \left(\frac{\kappa'}{\kappa''} - \rho_1 \hat{\Gamma} / i\kappa'' \right)}{\hat{\Gamma} (\rho_1 - \hat{\Gamma} / i\kappa'')} e^{-\gamma z} s_1 \quad (36)$$

한편 DFB 구조내 임의의 z값에서, R(z)로 표시되는 wave의 power는 다음과 같이 구할 수 있다. 여기서 c₁은 임의의 상수이다.

$$P_a(z) = c_1 |r_1 e^{\gamma z} + r_2 e^{-\gamma z}|^2 \quad (37)$$

마찬가지로 S(z)로 표시되는 wave의 power는 다음과 같다.

$$P_b(z) = c_1 |s_1 e^{\gamma z} - s_2 e^{-\gamma z}|^2 \quad (38)$$

따라서 식 (34), (35), (36)을 식 (37), (38)에 대입하여, P_a(z) 및 P_b(z)의 profile을 구할 수 있다. 또한 식 (34), (35), (36)을 식 (15), (16)에 대입하면, cavity 내의 total intensity profile을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_t(z) = c_1 |R(z) + S(z)|^2 \quad (39)$$

Ⅲ. 레이저 특성 수치해석

1. 계산 방법

First-order Bragg scattering이 일어나도록 grating을 만들어 줄 경우 좌측 mirror와 우측 mirror의 위치에 따른 phase가 그림 1.에 나타나 있다. First order Bragg scattering이 일어나도록 하는 grating의 주기를 결정하기 위해서는, 먼저 도파 mode의 effective refractive index를 구해야 한다. 참고문헌^[4]의 data를 바탕으로 하여 도파 mode의 effective refractive index를 3.441로 선정하였다. 이 경우 first order Bragg scattering이 일어나는 grating의 주기는 0.225μm가 된다. 편의상 식 (1), (2)에서 Q = 0가 되게 z = 0가 되는 지점을 선택하였고, 식 (30)의 γ는 1 × 10⁻⁵ 보다 작은 error를 갖도록 반복 계산을 하였다.^[4]

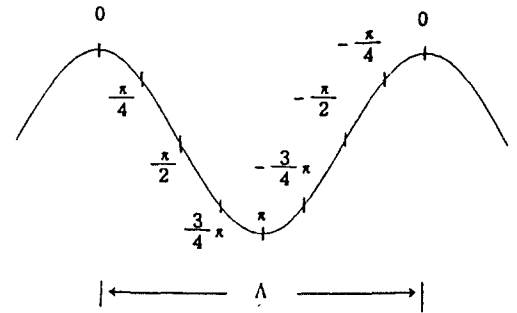
좌측 mirror의 위치 z = -L'/2과 우측 mirror의 위치 z = L''/2에 따라 식 (27)의 ρ과 식 (28)의 ρ₁의 phase가 바뀌게 되며, 이에 따라 threshold에서의 net gain α와 mode의 주파수, field profile 등이 변화하게 된다. 이러한 특성 변화는 식 (30)에서 알

수 있듯이 식 (13) 및 (14)의 k 값과 ΔQ에 의존하게 된다.

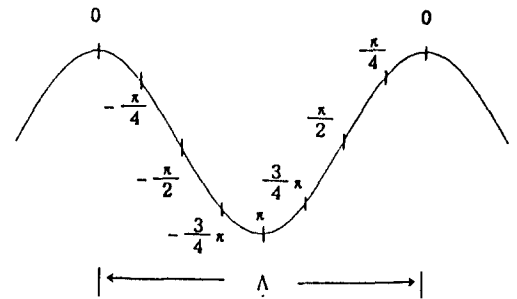
$$\kappa L = \left(\frac{\beta}{2} \right) \left(\frac{\Delta n}{n} \right) L + i \left(\frac{\Delta \alpha}{2} \right) L \cdot \cos(\Delta Q) = (\kappa L)_r + i(\kappa L)_i \cdot \cos(\Delta Q)$$

로 표현할 수 있으며, 편의상 (κL)_r = $\left(\frac{\beta}{2} \right) \left(\frac{\Delta n}{n} \right) L = 0.0, 0.1, 0.5, 1, 2, 3, \dots, 10$ 의 13개 값을 선택하였고, (κL)_i = $\left(\frac{\Delta \alpha}{2} \right) L = 0.0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$ 의 6개 값을 선택하였다.

ΔQ는 index grating과 gain grating의 위상 차이이며, 식 (7), (13), (14)에서 알 수 있듯이 0 ≤ ΔQ < π 구간과 π < ΔQ ≤ 2π 구간이 대칭적이므로, 0 ≤ ΔQ < π 구간에 대하여 편의상 ΔQ = 0.0, π/4, π/2, 3π/4, π로 5개 값을 선택하였다.



(a) 좌측 mirror



(b) 우측 mirror

그림 1. First order Bragg scattering인 경우, 좌측 및 우측 mirror의 위치에 따른 phase
Fig. 1. Phases as a function of left and right mirror positions with first order Bragg scattering.

좌측 및 우측 mirror의 위치에 따른 특성을 파악하기 위하여 편의상 좌측 mirror의 위치 z = -L'/2과 우측 mirror의 위치 z=L''/2을, z = $\frac{-199.6621}{2}$ μm (phase=π/2), z = $\frac{-199.774}{2}$ μm (phase = π), z =

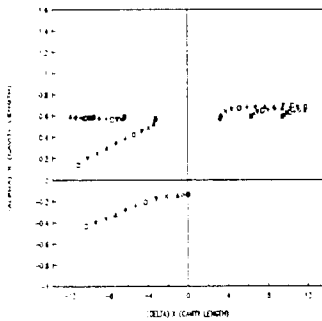
$\frac{199.8873}{2} \mu\text{m}$ (phase = $-\frac{\pi}{2}$)와 $z = \frac{200}{2} \mu\text{m}$ (phase = 0)의 4 경우로 나누어서 계산하였다. 좌우 대칭성에 의하여 모든 경우의 수에 대하여 계산하지 않고, 다음과 같은 10개의 경우에 대하여 계산하였다.

- (a) ρ_l 의 phase = 0, ρ_r 의 phase = 0
- (b) ρ_l 의 phase = 0, ρ_r 의 phase = $\pi/2$
- (c) ρ_l 의 phase = 0, ρ_r 의 phase = π
- (d) ρ_l 의 phase = 0, ρ_r 의 phase = $-\pi/2$
- (e) ρ_l 의 phase = $\pi/2$, ρ_r 의 phase = $\pi/2$
- (f) ρ_l 의 phase = $\pi/2$, ρ_r 의 phase = π
- (g) ρ_l 의 phase = $\pi/2$, ρ_r 의 phase = $-\pi/2$
- (h) ρ_l 의 phase = π , ρ_r 의 phase = π

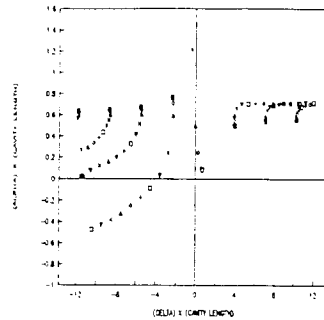
- (i) ρ_l 의 phase = π , ρ_r 의 phase = $-\pi/2$
- (j) ρ_l 의 phase = $-\pi/2$, ρ_r 의 phase = $-\pi/2$

2. 계산 결과 및 검토

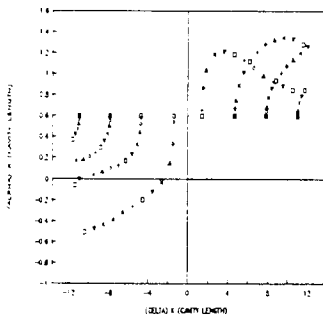
1) Mirror의 위치가 modal gain에 미치는 영향
 Mirror의 위치에 따라 식 (27) 및 (28)의 phase가 영향을 받게되고 따라서 gain α 와 식 (12)의 $\delta\alpha$ 영향을 받게된다. 편이상 $\Delta\Omega = 0$, $(\kappa L)_i = 0.7$ 로 고정시키고, 좌측 및 우측 mirror의 phase를 앞 절의 (a) (j) 의 10 가지로 변화시키면서, 각 발진 모드의 αL vs. $\delta\alpha L$ 을 $(\kappa L)_i$ 의 변화에 따라 그린 것이 그림 2.에 나타나 있다.



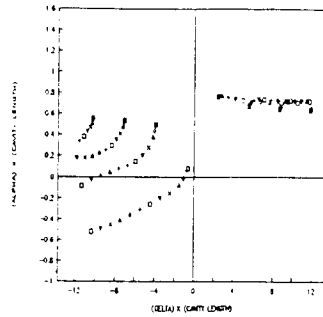
(a) ρ_l 의 phase = 0, ρ_r 의 phase = 0



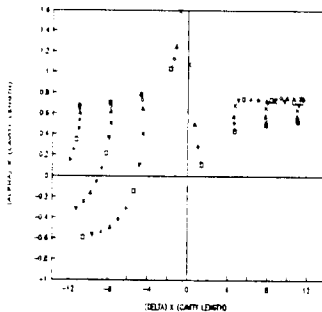
(b) ρ_l 의 phase = 0, ρ_r 의 phase = $\pi/2$



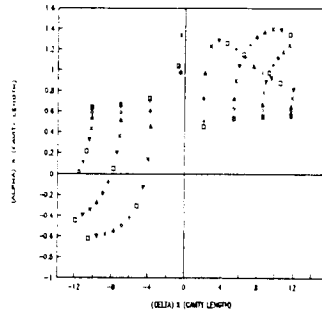
(c) ρ_l 의 phase = 0, ρ_r 의 phase = π



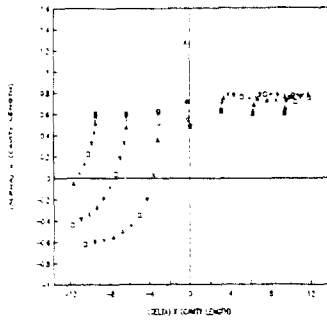
(d) ρ_l 의 phase = 0, ρ_r 의 phase = $-\pi/2$



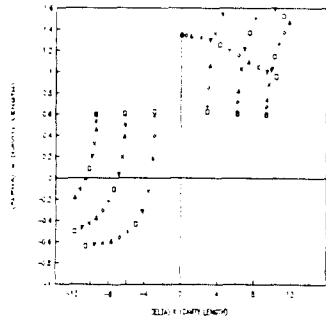
(e) ρ_l 의 phase = $\pi/2$, ρ_r 의 phase = $\pi/2$



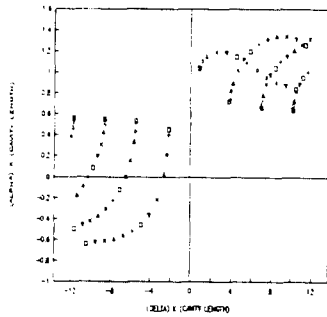
(f) ρ_l 의 phase = $\pi/2$, ρ_r 의 phase = π



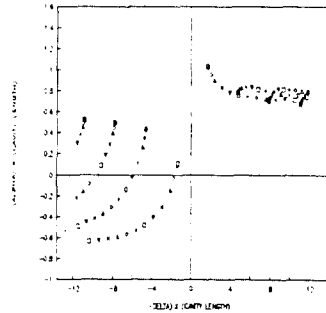
(g) ρ_l 의 phase = $\pi/2$, ρ_r 의 phase = $-\pi/2$



(h) ρ_l 의 phase = π , ρ_r 의 phase = π



(i) ρ_l 의 phase = π , ρ_r 의 phase = $-\pi/2$



(j) ρ_l 의 phase = $-\pi/2$, ρ_r 의 phase = $-\pi/2$

그림 2. $\Delta Q=0$, $(\kappa L)_r=0.7$ 로 고정하고 $(\kappa L)_l$ 을 0에서 10까지 변화시킬 때, 좌측 및 우측 mirror의 phase 조합 10가지에 대한 각 발진 모드의 α_L vs. δ_L graph.

Fig. 2. α_L vs. δ_L graph with $(\kappa L)_l$ as a parameter, in case of $\Delta Q=0$ and $(\kappa L)_r=0.7$.

그림에서 각 모드는 기호로 표시되어 있으며, $(\kappa L)_r=0$ 은 [□], $(\kappa L)_r=0.1$ 은 [+], $(\kappa L)_r=0.5$ 는 [◇], $(\kappa L)_r=1$ 은 [△], $(\kappa L)_r=2$ 은 [×], $(\kappa L)_r=3$ 은 [▽], $(\kappa L)_r=4$ 는 [○], $(\kappa L)_r=5$ 는 [+], $(\kappa L)_r=6$ 은 [◇], $(\kappa L)_r=7$ 은 [△], $(\kappa L)_r=8$ 은 [×], $(\kappa L)_r=9$ 는 [▽], $(\kappa L)_r=10$ 은 [□]의 순서로 되어있다. 순수하게 index grating만 있는 $(\kappa L)_r=0$ 인 경우에는 (c), (e), (g) 그리고 (j)의 조건에서 α_L vs. δ_L graph가 좌우 대칭이어서⁴, 동시에 두 모드가 발진하는 단점이 있으나, 식 (2)로 주어지는 gain grating을 첨가시킬 경우 그림 2와 같이 모드 선별성이 두드러지게 향상됨을 알 수 있다. 따라서 mirror의 위치에 따른 phase의 변화에 별 상관없이 한 개의 발진모드를 선택할 수 있는 장점을 갖는다.

2) ΔQ 와 $(\kappa L)_l$ 가 modal gain에 미치는 영향
좌측 및 우측 mirror의 phase는 (ρ_l 의 phase=0.

ρ_r 의 phase=0)로 고정하고, ΔQ 와 $(\kappa L)_l$ 가 발진모드에 미치는 영향을 살펴보기 위하여, $(\kappa L)_r=0, 0.3, 0.7$ 의 3경우로 변화시키고, $\Delta Q=0, \pi/2, \pi$ 의 3경우로 변화시키면서, α_L vs. δ_L graph를 그린 것이 그림 3에 나타나 있다. 가로방향은 $(\kappa L)_l$ 가 증가하는 방향이고 세로방향은 ΔQ 가 증가하는 방향이다.

먼저 ΔQ 를 고정시키고 $(\kappa L)_l$ 를 변화시킬 경우를 살펴보면 다음과 같다. $\Delta Q=0$ 로 고정시킨 경우에는 $(\kappa L)_l$ 가 증가하면서, $\delta_L < 0$ 의 모드들은 α_L 이 감소하고 $\delta_L > 0$ 모드들은 α_L 이 증가하는 반시계 방향 회전 경향을 보인다.

그러나 $\Delta Q=\pi$ 인 경우에는 이와 반대로, $(\kappa L)_l$ 가 증가하면서 $\delta_L < 0$ 의 모드들은 α_L 이 증가하고 $\delta_L > 0$ 모드들은 α_L 이 감소하는 시계 방향 회전 경향을 보인다. 또한 $\Delta Q=\pi/2$ 인 경우에는, $(\kappa L)_l$ 가 증가하면서 전반적으로 α_L 의 변화가 거의 없으며, 단지 $\delta_L \approx 0$

근방의 모드만이 미소한 변화를 보이는 것을 알 수 있다.

다음 $(\kappa L)_i$ 를 고정시키고 ΔQ 를 변화시킬 경우를 살펴보면 다음과 같다. $(\kappa L)_i=0.7$ 로 고정시키고, $\Delta Q=0, \pi/2, \pi$ 로 증가할 때 $\delta L < 0$ 의 모드들은 αL 이 증가하고, $\delta L > 0$ 모드들은 αL 이 감소하는 시계 방향의 회전 경향을 보인다. 따라서 $\Delta Q=\pi/2$ 가 되면, $\Delta Q=0$ 일때 $(\kappa L)_i$ 가 0에서 0.7로 증가하면서 αL 이 반시계 방향의 회전 변화를 한 것이, ΔQ 가 0에서 $\pi/2$ 로 되면서 시계 방향의 회전과 상쇄되어, 다시 원상태 ($\Delta Q=0$ 이고 $(\kappa L)_i=0$)로 돌아오는 경향을 보인다.

상기의 경향은 (ρ_1 의 phase=0, ρ_2 의 phase=0)이

아닌 다른 ρ_1 의 phase 및 ρ_2 의 phase를 갖는 경우에도 동일하며, 따라서 $\Delta Q=\pi/2$ 인 경우에는, αL vs. δL graph가 좌우대칭인 경우 gain grating의 효과를 증가시켜도 특성이 개선되지 않으므로, 모드 선별성이 매우 불량하여 DFB 레이저로 부적합함을 알 수 있다.

3) 발진모드의 gain 선별성과 안정성

여러가지 $(\kappa L)_i$ 과 $(\kappa L)_r$, 그리고 ΔQ 값에 대하여 발진모드의 gain 선별성을 비교하기 위하여, 좌측 및 우측 mirror의 위치를 III-1. 절의 (a) (j)의 10가지 경우로 변화시키면서, 각 경우에 대한 threshold gain이 제일 작은 모드(발진 모드)와 그 다음으로 작은 모드 간의 threshold gain의 차이 Δg_{th} 를 구하

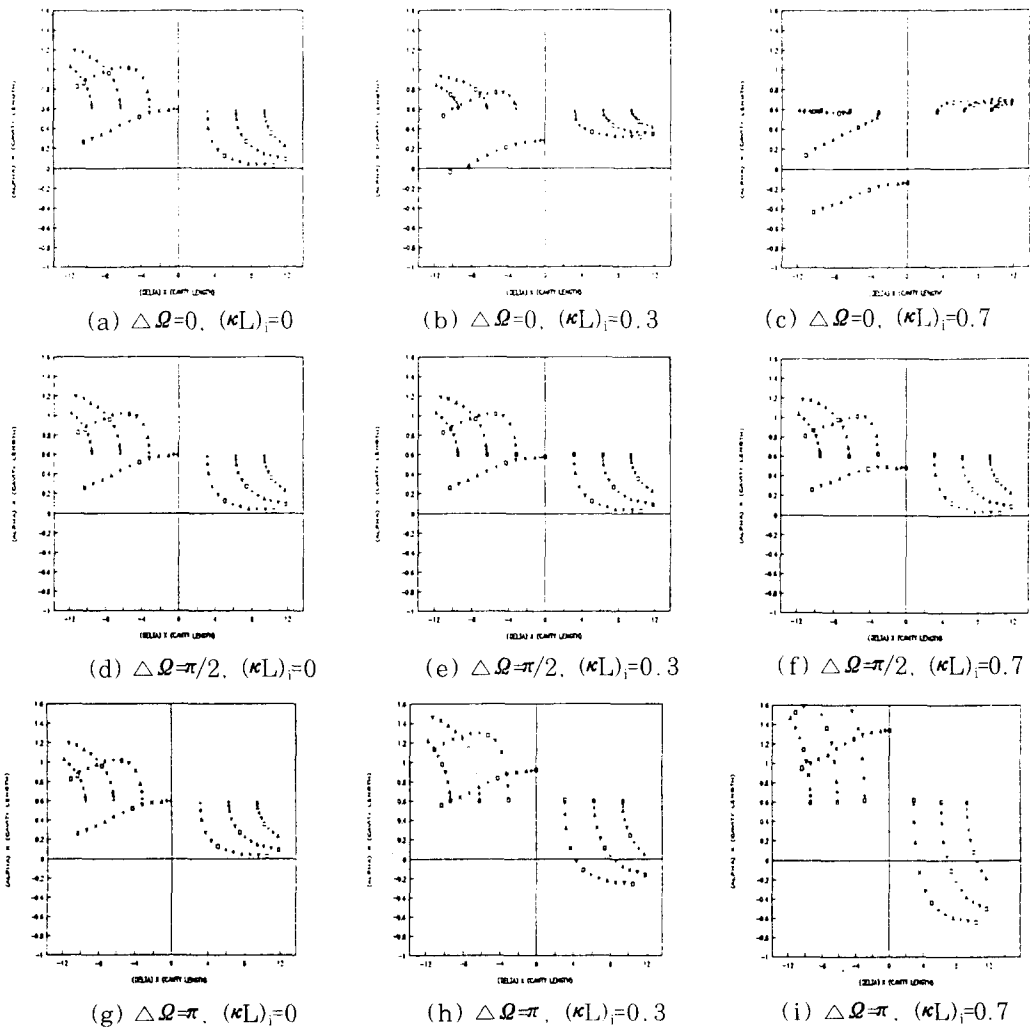


그림 3. ρ_1 의 phase=0, ρ_2 의 phase=0 으로 고정하고, ΔQ 와 $(\kappa L)_i$ 를 변화시킬 때의 αL vs. δL graph
Fig. 3. αL vs. δL graph with $(\kappa L)_i$ as a parameter, in case of phase of $\rho_1=0$ and phase of $\rho_2=0$.

여. 총 10 가지 경우 중에서 제일 작은 Δg_{th} 값을. 주어진 $(\kappa L)_r$, $(\kappa L)_i$, 그리고 ΔQ 값에서의 $\min \Delta g_{th}$ 로 계산하였다.

① $\Delta Q=0$ 인 경우

표 1. $(\kappa L)_r$ 과 $(\kappa L)_i$ 에 따른 $\min[\Delta g_{th}]$ as parametersl.

$(\kappa L)_r$	$(\kappa L)_i$	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
1	< 1.E-4	7.E-4	0.003	0.004	0.059	0.061	
2	< 1.E-4	0.040	0.008	0.085	0.099	0.111	
3	< 1.E-4	0.089	0.072	0.111	0.136	0.312	
4	< 1.E-4	0.121	0.122	0.244	0.326	0.378	
5	< 1.E-4	0.100	0.173	0.225	0.285	0.334	
6	< 1.E-4	0.064	0.173	0.225	0.285	0.334	
7	< 1.E-4	0.024	0.149	0.182	0.225	0.285	
8	< 1.E-4	0.012	0.127	0.156	0.184	0.225	

표 2. $(\kappa L)_r$ 과 $(\kappa L)_i$ 에 따른 $\min(\min[P_i(z)]/Max[P_i(z)])$ (x E-2)

Table 2. $\min(\min[P_i(z)]/Max[P_i(z)])$ with $(\kappa L)_r$ and $(\kappa L)_i$ as parametersl.

$(\kappa L)_r$	$(\kappa L)_i$	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
1	< 1.E-7	< 1.E-7	< 1.E-7	< 1.E-7	3.148	3.058	
2	< 1.E-7	< 1.E-7	0.095	0.297	1.345	1.272	
3	< 1.E-7	< 1.E-7	0.722	0.761	0.788	0.806	
4	< 1.E-7	< 1.E-7	0.525	0.867	0.553	0.561	
5	< 1.E-7	< 1.E-7	0.420	0.423	0.429	0.431	
6	< 1.E-7	< 1.E-7	0.350	0.350	0.349	0.348	
7	< 1.E-7	< 1.E-7	0.337	0.291	0.289	0.287	
8	< 1.E-7	< 1.E-7	0.245	0.243	0.242	0.240	

② $\Delta Q=\pi/4$ 인 경우

표 3. $(\kappa L)_r$ 과 $(\kappa L)_i$ 에 따른 $\min[\Delta g_{th}]$ as parametersl.

$(\kappa L)_r$	$(\kappa L)_i$	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
1	< 1.E-4	2.E-4	0.002	0.004	0.010	0.027	
2	< 1.E-4	0.028	0.039	0.039	0.008	0.011	
3	< 1.E-4	0.063	0.003	0.060	0.219	0.250	
4	< 1.E-4	0.089	0.003	0.162	0.275	0.313	
5	< 1.E-4	0.106	0.001	0.212	0.244	0.277	
6	< 1.E-4	0.101	0.039	0.184	0.212	0.240	
7	< 1.E-4	0.078	0.074	0.158	0.182	0.206	
8	< 1.E-4	0.042	0.111	0.135	0.156	0.176	

표 4. $(\kappa L)_r$ 과 $(\kappa L)_i$ 에 따른 $\min(\min[P_i(z)]/Max[P_i(z)])$

Table 4. $\min(\min[P_i(z)]/Max[P_i(z)])$ with $(\kappa L)_r$ and $(\kappa L)_i$ as parametersl.

$(\kappa L)_r$	$(\kappa L)_i$	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
1	< 1.E-7	0.012	0.107	0.289	3.647	3.817	
2	< 1.E-7	0.051	0.428	0.782	0.552	0.515	
3	< 1.E-7	0.051	0.602	0.846	0.925	0.998	
4	< 1.E-7	0.051	0.453	0.611	0.655	0.689	
5	< 1.E-7	0.051	0.452	0.476	0.501	0.517	
6	< 1.E-7	0.051	0.371	0.446	0.394	0.404	
7	< 1.E-7	0.051	0.309	0.311	0.318	0.324	
8	< 1.E-7	< 5.E-2	0.246	0.255	0.261	0.264	

③ $\Delta Q=\pi/2$ 인 경우

표 5. $(\kappa L)_r$ 과 $(\kappa L)_i$ 에 따른 $\min[\Delta g_{th}]$ as parametersl.

$(\kappa L)_r$	$(\kappa L)_i$	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
1	< 1.E-4	0.156	0.117	0.077	0.077	0.061	0.013
2	< 1.E-4	0.212	0.207	0.202	0.186	0.175	0.148
3	< 1.E-4	0.210	0.194	0.194	0.194	0.194	0.178
4	< 1.E-4	0.163	0.203	0.203	0.162	0.162	0.202
5	< 1.E-4	0.160	0.160	0.160	0.160	0.160	0.213
6	< 1.E-4	0.137	0.137	0.137	0.137	0.201	0.202
7	< 1.E-4	0.171	0.171	0.129	0.E+0	0.E+0	0.E+0
8	< 1.E-4	0.E+0	0.E+0	0.122	0.162	0.E+0	0.E+0

표 6. $(\kappa L)_r$ 과 $(\kappa L)_i$ 에 따른 $\min(\min[P_i(z)]/Max[P_i(z)])$

Table 6. $\min(\min[P_i(z)]/Max[P_i(z)])$ with $(\kappa L)_r$ and $(\kappa L)_i$ as parametersl.

$(\kappa L)_r$	$(\kappa L)_i$	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
1	< 1.E-7	0.003	0.030	0.082	0.693	1.153	
2	< 1.E-7	0.037	0.331	0.684	1.395	2.040	
3	< 1.E-7	0.049	0.438	0.501	1.281	1.540	
4	< 1.E-7	0.059	0.523	0.849	0.840	0.832	
5	< 1.E-7	0.006	0.587	0.601	0.595	0.590	
6	< 1.E-7	0.071	0.379	0.399	0.418	0.435	
7	< 1.E-7	0.075	0.313	0.324	0.335	0.338	
8	< 1.E-7	0.079	0.259	0.266	0.269	0.268	

④ $\Delta Q=3\pi/4$ 인 경우

표 7. $(\kappa L)_r$ 과 $(\kappa L)_i$ 에 따른 $\min[\Delta g_{th}]$ as parametersl.

$(\kappa L)_r$	$(\kappa L)_i$	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
1	< 1.E-4	1.E-4	0.002	0.004	0.010	0.099	
2	< 1.E-4	0.028	0.012	0.074	0.085	0.097	
3	< 1.E-4	0.063	0.002	0.187	0.219	0.256	
4	< 1.E-4	0.089	0.003	0.225	0.275	0.310	
5	< 1.E-4	0.106	0.011	0.244	0.244	0.277	
6	< 1.E-4	0.101	0.039	0.184	0.212	0.240	
7	< 1.E-4	0.078	0.074	0.158	0.182	0.206	
8	< 1.E-4	0.042	0.111	0.135	0.156	0.176	

표 8. $(\kappa L)_r$ 과 $(\kappa L)_i$ 에 따른 $\min(\min[P_i(z)]/Max[P_i(z)])$

Table 8. $\min(\min[P_i(z)]/Max[P_i(z)])$ with $(\kappa L)_r$ and $(\kappa L)_i$ as parametersl.

$(\kappa L)_r$	$(\kappa L)_i$	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
1	< 1.E-7	0.052	0.313	0.729	0.971	1.345	
2	< 1.E-7	0.019	0.174	0.421	0.575	0.898	
3	< 1.E-7	0.025	0.229	0.592	0.937	1.350	
4	< 1.E-7	0.030	0.270	0.755	1.275	2.015	
5	< 1.E-7	0.033	0.301	0.836	1.255	1.255	
6	< 1.E-7	0.036	0.336	0.894	1.255	0.965	
7	< 1.E-7	< 4.E-2	0.340	0.941	1.255	0.417	
8	< 1.E-7	< 4.E-2	0.353	0.977	0.883	0.153	

⑤ $\Delta Q = \pi$ 인 경우

표 9. $(\kappa L)_r$ 과 $(\kappa L)_i$ 에 따른 $\min[\Delta g_{th}]$
Table 9. $\min[\Delta g_{th}]$ with $(\kappa L)_r$ and $(\kappa L)_i$ as parametersl.

$(\kappa L)_r$	$(\kappa L)_i$	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
1	<	1.E-4	7.E-4	0.003	0.004	0.059	0.061
2	<	1.E-4	0.040	0.008	0.085	0.099	0.111
3	<	1.E-4	0.089	0.072	0.085	0.254	0.312
4	<	1.E-4	0.121	0.122	0.001	0.326	0.378
5	<	1.E-4	0.100	0.171	0.000	0.297	0.334
6	<	1.E-4	0.064	0.173	0.000	0.280	0.325
7	<	1.E-4	0.024	0.149	0.182	0.182	0.240
8	<	1.E-4	0.012	0.127	0.156	0.184	0.232

표 10. $(\kappa L)_r$ 과 $(\kappa L)_i$ 에 따른 $\min(\min[P_i(z)]/Max [P_i(z)])$

Table 10. $\min(\min[P_i(z)]/Max [P_i(z)])$ with $(\kappa L)_r$ and $(\kappa L)_i$ as parametersl.

$(\kappa L)_r$	$(\kappa L)_i$	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
1	<	0.012	6.E-4	0.068	0.025	0.003	0.011
2	<	0.009	0.009	0.016	0.027	0.009	0.028
3	<	0.012	0.074	0.237	0.012	0.047	0.068
4	<	0.008	0.186	0.961	0.004	0.014	0.007
5	<	0.260	9.E-4	0.088	2.E-4	0.006	0.030
6	<	15.35	156.0	0.569	0.069	0.004	7.E-4
7	<	5.580	< 1.E-3	0.458	0.116	1.E-4	0.008
8	<	260.3	89.28	1.013	0.224	0.037	0.039

동시에 발진 모드가 안정하려면 spatial hole burning 현상이 없어야 한다. 이를 비교하기 위하여 식 (39)에 의한 longitudinal direction으로의 intensity profile $P_i(z)$ 를 구하여 발진모드의 $\min [P_i(z)]/Max [P_i(z)]$ 를 계산하고, ρ_i 의 phase 및 ρ_r 의 phase 10 가지 경우 중에서 제일 작은 $\min [P_i(z)]/Max [P_i(z)]$ 값을, 주어진 $(\kappa L)_r$, $(\kappa L)_i$, 그리고 ΔQ 값에서의 $\min(\min [P_i(z)]/Max [P_i(z)])$ 로 함으로써, 이 수치를 비교하여 발진 모드의 안정성에 대한 척도로 사용하였다.

$\Delta Q = 0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4, \pi$ 의 다섯 가지 경우에 대하여, 발진모드의 gain 선별성과 안정성을 표로 정리 하면 표1~표10과 같다.

표1~표10의 결과를 검토하면 $\min[\Delta g_{th}]$ 값이 커서 발진 모드 선별성이 좋은 경우는 $\Delta Q = 0$ (표1)와 $\Delta Q = \pi$ (표9)인 경우이고, $\Delta Q = \pi/2$ (표5)인 경우에는 III-2.절 2)에서 검토한 바와 같이 αL vs. δL graph가 좌우 대칭인 경우 개선이 안되는 까닭에, $\Delta Q = 0$ 와 $\Delta Q = \pi$ 인 경우에 비하여 $1/10^4$ 이하의 선별성을 갖는다. $\Delta Q = 0$ 와 $\Delta Q = \pi$ 인 두 경우에 대하여, 좋은 발진 모드 선별성을 보이는 $(\kappa L)_r$ 과 $(\kappa L)_i$ 의 범위를 구하면, $(\kappa L)_r$ 는 3~5인 경우이고 $(\kappa L)_i$ 는 0.7~0.9으로 클수록 좋다.

발진 모드 안정성을 비교하기 위한 $\min(\min [P_i(z)]/Max [P_i(z)])$ 값을 보면 $\Delta Q = \pi$ (표10)인 경우, 나머지 네 경우 보다 $1/10^{11}$ 이하로 매우 나쁜 특성을 보여준다.

① $\Delta Q = 0$ 인 경우 (x E-2)

표 11. $(\kappa L)_r$ 과 $(\kappa L)_i$ 에 따른 $(\min[\Delta g_{th}] \times \min(\min[P_i(z)]/Max [P_i(z)]))$

Table 11. $(\min[\Delta g_{th}] \times \min(\min[P_i(z)]/Max [P_i(z)])$ with $(\kappa L)_r$ and $(\kappa L)_i$ as parametersl.

$(\kappa L)_r$	$(\kappa L)_i$	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
1	<	1.E-10	< 1.E-10	< 1.E-10	< 1.E-10	0.185	0.187
2	<	1.E-10	< 1.E-10	8.E-4	0.110	0.133	0.153
3	<	1.E-10	< 1.E-10	0.052	0.167	0.206	0.242
4	<	1.E-10	< 1.E-10	0.064	0.250	0.181	0.232
5	<	1.E-10	< 1.E-10	0.072	0.103	0.124	0.144
6	<	1.E-10	< 1.E-10	0.061	0.074	0.087	0.100
7	<	1.E-10	< 1.E-10	0.050	0.053	0.062	0.071
8	<	1.E-10	< 1.E-10	0.031	0.038	0.045	0.051

② $\Delta Q = \pi/4$ 인 경우 (x E-2)

표 12. $(\kappa L)_r$ 과 $(\kappa L)_i$ 에 따른 $(\min[\Delta g_{th}] \times \min(\min[P_i(z)]/Max [P_i(z)]))$

Table 12. $(\min[\Delta g_{th}] \times \min(\min[P_i(z)]/Max [P_i(z)])$ with $(\kappa L)_r$ and $(\kappa L)_i$ as parametersl.

$(\kappa L)_r$	$(\kappa L)_i$	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
1	<	1.E-10	2.E-6	3.E-4	0.001	0.036	0.102
2	<	1.E-10	0.001	0.017	0.030	0.012	0.019
3	<	1.E-10	0.003	0.002	0.051	0.280	0.250
4	<	1.E-10	0.005	0.001	0.099	0.180	0.210
5	<	1.E-10	0.005	7.E-4	0.101	0.122	0.143
6	<	1.E-10	0.005	0.014	0.082	0.083	0.097
7	<	1.E-10	0.004	0.023	0.049	0.058	0.067
8	<	1.E-10	< 2.E-3	0.027	0.034	0.041	0.046

③ $\Delta Q = \pi/2$ 인 경우 (x E-6)

표 13. $(\kappa L)_r$ 과 $(\kappa L)_i$ 에 따른 $\min[\Delta g_{th}] (\min [\Delta g_{th}] \times \min(\min[P_i(z)]/Max [P_i(z)]))$

Table 13. $(\min[\Delta g_{th}] \times \min(\min[P_i(z)]/Max [P_i(z)])$ with $(\kappa L)_r$ and $(\kappa L)_i$ as parametersl.

$(\kappa L)_r$	$(\kappa L)_i$	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
1	<	1.E-9	4.E-4	0.002	0.006	0.043	0.014
2	<	1.E-9	0.008	0.067	0.127	0.209	0.302
3	<	1.E-9	0.010	0.085	0.194	0.244	0.223
4	<	1.E-9	0.012	0.106	0.138	0.136	0.168
5	<	1.E-9	0.011	0.094	0.096	0.095	0.126
6	<	1.E-9	0.010	0.052	0.055	0.084	0.088
7	<	1.E-9	0.013	0.040	< 1.E-9	< 1.E-9	< 1.E-9
8	<	1.E-9	< 1.E-9	0.031	0.043	< 1.E-9	< 1.E-9

④ $\Delta Q=3\pi/4$ 인 경우 (x E-2)

표 14. $(\kappa_L)_r$ 과 $(\kappa_L)_i$ 에 따른 $(\min[\Delta g_{th}] \times \min(\min[P_i(z)] / \text{Max}[P_i(z)])$

Table 14. $(\min[\Delta g_{th}] \times \min(\min[P_i(z)] / \text{Max}[P_i(z)])$ with $(\kappa_L)_r$ and $(\kappa_L)_i$ as parametersl .

$(\kappa_L)_r$	$(\kappa_L)_i$	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
1	< 1.E-10	8.E-6	8.E-4	0.003	0.010	0.103	
2	< 1.E-10	5.E-4	0.002	0.031	0.049	0.087	
3	< 1.E-10	0.002	6.E-4	0.111	0.174	0.375	
4	< 1.E-10	0.003	9.E-4	0.175	0.342	0.625	
5	< 1.E-10	0.004	0.003	0.178	0.374	0.459	
6	< 1.E-10	0.004	0.013	0.164	0.366	0.357	
7	< 1.E-10	< 3.E-3	0.025	0.148	0.355	0.086	
8	< 1.E-10	< 2.E-3	0.039	0.132	0.137	0.027	

⑤ $\Delta Q=\pi$ 인 경우

표 15. $(\kappa_L)_r$ 과 $(\kappa_L)_i$ 에 따른 $(\min[\Delta g_{th}] \times \min(\min[P_i(z)] / \text{Max}[P_i(z)])$

Table 15. $(\min[\Delta g_{th}] \times \min(\min[P_i(z)] / \text{Max}[P_i(z)])$ with $(\kappa_L)_r$ and $(\kappa_L)_i$ as parametersl .

$(\kappa_L)_r$	$(\kappa_L)_i$	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
1	2.E-19	4.E-19	2.E-16	1.E-16	2.E-16	7.E-16	
2	2.E-19	3.E-16	1.E-16	2.E-15	8.E-16	3.E-15	
3	2.E-19	7.E-15	2.E-14	3.E-15	1.E-14	2.E-14	
4	1.E-19	2.E-14	1.E-13	4.E-18	5.E-15	3.E-15	
5	4.E-18	9.E-17	2.E-14	4.E-17	2.E-15	1.E-14	
6	2.E-16	1.E-11	1.E-13	1.E-14	9.E-16	2.E-16	
7	1.E-16	< 3.E-11	7.E-14	2.E-14	2.E-17	2.E-15	
8	0.E+00	1.E-12	1.E-13	3.E-14	7.E-15	8.E-15	

$\Delta Q=\pi$ 를 제외한 나머지 네 경우는 $(\kappa_L)_i$ 가 0.3~0.9인 경우 양호한 특성을 나타낸다.

결국 안정된 동작을 하기 위해서는 $\min[\Delta g_{th}]$ 값이 커야하며, 동시에 $\min(\min[P_i(z)] / \text{Max}[P_i(z)])$ 값도 커야한다. 따라서 이 두 값의 곱을 좋은 LD에 대한 기준적으로 삼는 것은 타당하다. 이 두 값의 곱을 표로 정리하면 표11~표15와 같다.

표11~표15의 결과를 정리하면 $\Delta Q=0$ 인 gain-coupled DFB 레이저에서는 $(\kappa_L)_i$ 가 3~4일 때 그리고 $(\kappa_L)_r$ 는 0.5~0.9일 때가 최적조건이며, $\Delta Q=\pi$ 인 loss-coupled DFB 레이저에서는 $(\kappa_L)_r$ 과 $(\kappa_L)_i$ 값에 관계없이 항상, $\Delta Q=0$ 인 gain-coupled DFB 레이저에 비하여 그 값이 $1/10^{10}$ 이하이므로, 특성이 나쁘다는 것을 알 수 있다. 전체 경우 중 가장 좋은 수치를 나타내는 조건은 $\Delta Q=3\pi/4$, $(\kappa_L)_r=4$, $(\kappa_L)_i=0.9$ 일 때의 0.625×10^{-2} 로, $\Delta Q=0$ 인 gain-coupled DFB 레이저의 최적조건 0.252×10^{-2} 때 보다 2.5 배 향상된 값을 갖는다. 결론적으로 mirror

의 위치에 관계없이 좋은 특성을 갖는 레이저 다이오드를 만들기 위해서는, index grating과 gain grating의 위상 차이를 $\Delta Q=3\pi/4$ 로 하고, $(\kappa_L)_i=0.9$ 일 경우는 $(\kappa_L)_r=4\sim 6$ 으로, $(\kappa_L)_i=0.7$ 일 때는 $(\kappa_L)_r=3\sim 5$ 로하는 것이 바람직함을 알 수 있다. 이는 $\Delta Q=3\pi/4$ 인 경우, 큰 값의 $\min[\Delta g_{th}]$ 을 갖는 κ_L 의 범위와 큰 값의 $\min(\min[P_i(z)] / \text{Max}[P_i(z)])$ 을 갖는 κ_L 의 범위가, 서로 비슷한 것에서 연유한다. $\Delta Q=\pi/2$ 인 경우 αL vs. δL graph의 좌우 대칭성이 개선되지 않아 $\min[\Delta g_{th}]$ 값이 작은 것이 원인이 되어 특성이 나쁘고, $\Delta Q=\pi$ 인 경우 $\min(\min[P_i(z)] / \text{Max}[P_i(z)])$ 값이 특히 작은 것이 원인이 되어 제일 나쁜 특성을 나타낸다. $(\kappa_L)_i=0$ 인 순수 index coupled DFB 레이저는, 좌우대칭인 αL vs. δL graph를 갖는 좌우측 mirror의 phase 조건이 항상 존재하여, ΔQ 값에 관계없이 항상 $1/10^{10}$ 이하의 나쁜 특성을 보인다.

IV. 결론

AR coating을 하지않은 두 개의 mirror를 갖는 1.55μm DFB 레이저 다이오드에서, index grating과 gain grating이 공존하는 경우 두 grating의 구조와 배치방법에 따른, 발진 주파수와 발진이득 그리고 longitudinal direction으로의 beam profile 등의 특성 변화를 이론적으로 해석함으로써, mirror의 위치에 관계없이 좋은 특성의 LD를 얻을 수 있는 최적 구조를 찾는 것이 본 논문의 목적이다. III장의 해석결과를 통하여 $(\kappa_L)_r$ 과 $(\kappa_L)_i$, 그리고 ΔQ 의 변화에 따른 $\min[\Delta g_{th}]$ 값과 $\min(\min[P_i(z)] / \text{Max}[P_i(z)])$ 값의 변화 양상을 파악할 수 있으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

① $(\kappa_L)_i=0$ 인 순수한 index-coupled DFB레이저의 경우는, 좌우대칭인 αL vs. δL graph를 갖는 좌우측 mirror의 phase 조건이 항상 존재하여, 좌우 mirror의 위치에 매우 민감한 발진특성을 보이고 또한 발진파장의 degeneracy가 발생하는 단점이 있으나, gain grating을 동시에 만들어 주면 mirror의 위치에 관계없이 단일 모드가 안정되게 발진하도록 하는 것이 가능하며, 이러한 효과는 $(\kappa_L)_r$ 가 0.3 이상만 되면 두드러지고, $(\kappa_L)_i$ 가 0.9까지 커질수록 더욱 현저하게 나타난다.

② $\Delta Q=\pi$ 인 loss-coupled DFB 레이저보다 $\Delta Q=0$ 인 gain-coupled DFB 레이저가 $(\min[\Delta g_{th}] \times \min(\min[P_i(z)] / \text{Max}[P_i(z)])$ 값이 10^{10} 배 이상 더 좋은 특성을 보이며, $\Delta Q=0$ 인 gain-coupled DFB

레이저에서는 $(\kappa L)_r$ 값이 3~4일 때 그리고 $(\kappa L)_i$ 값은 0.5~0.9일 때가 최적조건이다.

③ mirror의 위치에 관계없이 좋은 특성을 갖는 레이저 다이오드를 만들기 위해서는, index grating과 gain grating의 위상 차이를 $\Delta\theta=3\pi/4$ 로 하고, $(\kappa L)_i=0.9$ 일 경우는 $(\kappa L)_r=4\sim 6$ 으로, $(\kappa L)_i=0.7$ 일 때는 $(\kappa L)_r=3\sim 5$ 로 하는 것이 최적 조건이다. 이 경우 $\Delta\theta=0$ 인 gain-coupled DFB 레이저 보다 2~2.5배 향상된 안정성을 갖는다. 이러한 효과는 $\Delta\theta=3\pi/4$ 인 경우, 큰 값의 $\min[\Delta g_{th}]$ 을 갖는 κL 의 범위와 큰 값의 $\min(\min[P_i(z)]/\max[P_i(z)])$ 을 갖는 κL 의 범위가 서로 비슷한 것이 그 원인이다.

④ $(\kappa L)_i$ 과 $(\kappa L)_r$ 에 따라 다르기는 하지만, 전반적으로 $\Delta\theta=3\pi/4$, $\Delta\theta=0$, $\Delta\theta=\pi/4$, $\Delta\theta=\pi/2$, $\Delta\theta=\pi$ 의 순서로 좋은 특성을 보이며, $\Delta\theta=\pi/2$ 와 $\Delta\theta=\pi$ 인 경우는 현격히 특성이 나빠진다.

상기 결론은 DFB 레이저의 정적 특성을 해석하여 얻은 결과이고, 변조시의 동적 특성을 고려할 경우 최적 조건이 변화할 수 있으며, 이는 현재 연구 진행 중이다.

參考文獻

- [1] T.L. Koch and U. Koren, "Semiconductor lasers for coherent optical fiber communications," J. Lightwave Technol., vol.8, pp.274-293, 1990.
- [2] Y. Luo, R. Takahashi, Y. Nakano, K. Tada, T. Kamiya, H. Hosomatsu, and H. Iwaoka, "Ultralow chirping short optical pulse (16 ps) generation in gain-coupled distributed feedback semiconductor lasers," Appl. Phys. Lett., vol. 59, no. 1, pp. 37-39, July 1991.
- [3] H.C. Casey and M.B. Panish, Heterostructure Lasers (Part A). Academic Press, pp.90-105, 1978.
- [4] 권기영, "DFB Laser의 Beam Profile에 관한연구", 한국전자통신연구소 (연구수행기관 : 공주대학교) 연구보고서, 제 2 장, 제 3 장, 1992.
- [5] J. Buus, "Mode selectivity in DFB lasers with cleaved facets," Electron. Lett., vol. 21, pp. 179-180, 1985.
- [6] J. Kinoshita and K. Matsumoto, "Yield analysis of SML DFB lasers with an axially-flattened internal field," IEEE J. Quantum Electron., vol. 25, pp. 1324-1332, 1989.
- [7] H. Soda, Y. Kotaki, H. Sudo, H. Ishikawa, S. Yamakoshi, and H. Imai, "Stability in single longitudinal mode operation in GaInAsP/InP phase-adjusted DFB lasers," IEEE J. Quantum Electron., vol. 23, pp. 804-814, 1987.
- [8] Y. Nakano, Y. Luo, and K. Tada, "Facet reflection independent, single longitudinal mode oscillation in a GaAlAs/GaAs distributed feedback laser equipped with a gain-coupling mechanism," Appl. Phys. Lett., vol. 55, pp. 1606-1608, 1989.
- [9] Y. Luo, Y. Nakano, K. Tada, T. Inone, H. Hosomatsu, and H. Iwakoka, "Purely gain-coupled distributed feedback lasers," Appl. Phys. Lett., vol. 56, pp. 1620-1622, 1990.

著者紹介

權奇英 (正會員) 第31卷 A編 第5號 參照
현재 공주대학교 전자공학과 조교수