

논문 2020-1-7 <http://dx.doi.org/10.29056/jsav.2020.06.07>

무반사 면을 갖는 DFB 레이저의 빔 분포 시뮬레이션과 검정

권기영*† , 기장근*

Simulation and Examination for Beam Profile of DFB Laser with an Anti-reflection Coated Mirror

Kee-Young Kwon*† , Jang-Geun Ki*

요 약

광대역 광통신 시스템에 사용되는 레이저는 우수한 주파수 선택성과 모드 안정성을 가져야한다. DFB(Distributed Feedback) 레이저는 고주파로 전류 변조를 하더라도 발진 주파수의 변화가 적다.

본 연구에서는 1.55 μm 의 파장을 갖는 DFB 레이저에서 굴절률 격자와 이득 격자가 동시에 존재할 때, 오른쪽 거울 면에 반사가 일어나지 않도록 유전막 코팅을 하여 $\rho_r=0$ 이 되도록 하였다. 문턱에서 최소 이득을 필요로 하는 제 1모드에 대하여, 종 방향으로의 발진 모드의 빔 분포와 방사전력비 P_l/P_r 를 ρ_l 의 위상= π 인 경우와 ρ_l 의 위상= $\pi/2$ 인 경우에 대하여 비교 검증했다. ρ_l 의 위상= π 인 경우, 낮은 문턱 전류와 높은 주파수 안정성을 얻기 위해서는, κL 이 8보다 커야 한다. ρ_l 의 위상= $\pi/2$ 인 경우, 낮은 문턱 전류를 위해서는 $\kappa L = 1.0$ 이 되도록 해야 하고, 이때 발진 주파수는 격자 주파수와 일치한다. 반사 방지 코팅을 하지 않은, 두 개의 거울 면을 가진 1.55 μm 의 파장을 갖는 DFB 레이저보다, 한쪽 거울 면에 무반사 코팅을 한 경우에 모드 선별성이 훨씬 크다.

Abstract

Lasers for optical broadband communication systems should have excellent frequency selectivity and modal stability. DFB lasers have low lasing frequency shift during high speed current modulation.

In this paper, when a refractive index grating and a gain grating are simultaneously present in a DFB laser having a wavelength of 1.55 μm , the dielectric film is coated so that reflection does not occur on the right mirror surface, so that $\rho_r=0$. For the first mode, which requires a minimum gain at the threshold, the beam distribution of the oscillation mode in the longitudinal direction and the radiated power ratio P_l/P_r were analyzed and compared for the cases of the phase of $\rho_l=\pi$ and $\pi/2$. If the phase of $\rho_l=\pi$, in order to obtain a low threshold current and high frequency stability, κL should be greater than 8. In the case of the phase of $\rho_l=\pi/2$, for low threshold current, κL is necessary to be 1.0, where the oscillation frequency coincides with the lattice frequency. DFB lasers with an anti-reflection coated mirror have excellent mode selectivity than 1.55 μm DFB lasers with two mirror facets

한글키워드 : DFB 레이저, 빔 분포, 격자의 위상, 굴절률 격자, 이득 격자

keywords : DFB laser, beam profile, grating phase, index grating, gain grating

* 공주대학교 전기전자제어공학부

접수일자: 2020.05.17. 심사완료: 2020.06.08.

† 교신저자: 권기영(kky@kongju.ac.kr)

게재확정: 2020.06.19.

1. 서론

광대역 광통신 시스템에서는 고속변조를 하여 통신 속도와 용량을 높인다. 이때 사용되는 레이저 광원은 주파수 선택성이 우수하고 안정된 주파수 동작을 해야 하며, 고주파로 전류 변조를 하더라도 발진 파장의 변화가 적어야 하므로 DFB(Distributed Feedback) 레이저가 각광을 받고 있다[1-5]. DFB 레이저는 브래그(Bragg) 산란을 이용하여 광의 피드백을 제공하는데, 굴절률 결합 DFB 레이저의 경우 발진 파장의 축퇴와 거울면의 반사율, 그리고 거울면의 위상에 따라 발진특성이 민감한 것이 문제이다. 이러한 문제를 개선하기 위해서 반사 방지 코팅을 한 4분의 1 파장 위상 천이된 DFB 레이저가 제안되었는데, 낮은 잔류 반사율($\ll 0.005$)이 요구되고 이득의 비선형성을 유발하는 공간적인 홀 버닝(spatial hole burning) 현상이 심한 것이 문제이다[6-10].

본 논문에서는 한쪽 거울 면에만 반사가 일어나지 않도록 유전막 코팅을 한 경우, 1.55um의 파장을 갖는 DFB 레이저에서 굴절률 격자와 이득 격자가 동시에 존재할 때, ρ_l 의 위상= π 인 경우와 ρ_l 의 위상= $\pi/2$ 인 경우에 대하여 발진 주파수와 발진 이득, 장축 방향으로의 빔 분포 특성을 이론적으로 해석한다. 2장에서는 해석을 위한 이론적인 바탕을 설명하고, 3장에서는 ρ_l 의 위상= π 인 경우와 ρ_l 의 위상= $\pi/2$ 인 경우에 대하여 DFB 레이저의 발진 모드에 대한 발진 이득과 빔의 분포 $|R(z)|$ 및 $|S(z)|$, 그리고 방사전력비 P_l/P_r 를 구하고, 낮은 문턱 전류와 주파수 안정성을 논의했다.

2. 시뮬레이션의 이론적 배경

2.1 발진 모드와 발진 이득

이득 격자와 굴절률 격자가 주는 효과를 모두 고려하기 위하여, 이득 격자와 굴절률 격자를 다음 식과 같이 표현한다.

$$n(z) = n + (\Delta n) \cos\left(\frac{2\pi z}{\Lambda} + \Omega\right) \quad (1)$$

$$\alpha(z) = \alpha + (\Delta\alpha) \cos\left(\frac{2\pi z}{\Lambda} + \Omega\right) \quad (2)$$

여기에서 $n(z)$ 는 굴절률이고, $\alpha(z)$ 는 이득이다. z 는 장축 방향으로의 좌표이고, $-\frac{L'}{2}$ 에서 $\frac{L''}{2}$ 까지 변화한다.

만족시켜야 하는 파동 방정식은 다음과 같다.

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

식 (3)의 해는 $E(z,t) = E(z)e^{j\omega t}$ 의 형태로 나타낼 수 있으며, 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$k^2(z) \approx \beta^2 + j2\alpha\beta + 4\kappa\beta \cos(2\beta_o z + \Omega) \quad (4)$$

여기서

$$\beta_o = \frac{\pi}{\Lambda} \quad (5)$$

$$\beta = \frac{\omega}{c} \quad (6)$$

$$\kappa = \left(\frac{\beta}{2}\right) \left(\frac{\Delta n}{n}\right) + j\frac{\Delta\alpha}{2} \quad (7)$$

식 (4)의 α 는 레이저 발진을 위한 문턱에서의 순 문턱 이득이며, 식 (6)의 발진 주파수 ω 는 β 를 알면 구할 수 있다.

일반성을 잃지 않고 $E(z)$ 를 다음과 같이 쓸 수 있다.

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

여기서 $R(z)$ 는 양(+)의 z 방향으로 전파하는 파이고, $S(z)$ 는 음(-)의 z 방향으로 전파하는 파이다. 식 (8)과 (3)으로부터 다음 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} & e^{-j\beta_o z} [-j2\beta_o R' - \beta_o^2 R + (\beta^2 + j2\alpha\beta)R] \\ & + e^{j\beta_o z} [j2\beta_o S' - \beta_o^2 S + (\beta^2 + j2\alpha\beta)S] \\ & + 2\kappa\beta(e^{j2\beta_o z} e^{j\Omega} + e^{-j2\beta_o z} e^{-j\Omega}) \\ & \times (R e^{-j\beta_o z} + S e^{j\beta_o z}) = 0 \quad (9) \end{aligned}$$

식 (9)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

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

여기서 $\delta = \beta - \beta_o$ 이고, $|\delta| \ll \beta$ 를 가정하였고, $e^{\pm j\beta_o z}$ 를 전파하는 파는 생략하였다.

식 (10)과 (11)은 다음 식의 해를 갖는다.

$$R(z) = R_1 e^{\gamma z} + R_2 e^{-\gamma z} \quad (12)$$

$$S(z) = S_1 e^{\gamma z} + S_2 e^{-\gamma z} \quad (13)$$

여기서 R_1, R_2, S_1, S_2 는 상수이다.

식 (12)와 (13)을 식 (10)과 (11)에 대입하면 다음 식을 얻는다.

$$\hat{\Gamma} R_1 = j\kappa e^{-j\Omega} S_1 \quad (14)$$

$$\Gamma R_2 = j\kappa e^{-j\Omega} S_2 \quad (15)$$

$$\Gamma S_1 = j\kappa e^{j\Omega} R_1 \quad (16)$$

$$\hat{\Gamma} S_2 = j\kappa e^{j\Omega} R_2 \quad (17)$$

여기서

$$\hat{\Gamma} = -\gamma + \alpha - j\delta \quad (18)$$

$$\Gamma = \gamma + \alpha - j\delta \quad (19)$$

식 (14)~(17)은 다음 식이 만족될 때 해를 가진다.

$$\gamma^2 = (\alpha - j\beta)^2 + \kappa^2 \quad (20)$$

식 (12)와 (13)으로 표현되는 $R(z)$ 와 $S(z)$ 는 왼쪽 거울 면이 위치한 $z = -\frac{L'}{2}$ 과 오른쪽 거울 면이 위치한 $z = \frac{L''}{2}$ 에서 다음의 경계 조건을 만족해야 한다.

$$\begin{aligned} & e^{j\beta_o L'/2} (R_1 e^{-\gamma L'/2} + R_2 e^{\gamma L'/2}) \\ & = \hat{\rho}_l e^{-j\beta_o L'/2} (S_1 e^{-\gamma L'/2} + S_2 e^{\gamma L'/2}) \quad (21) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & e^{j\beta_o L''/2} (S_1 e^{\gamma L''/2} + S_2 e^{-\gamma L''/2}) \\ & = \hat{\rho}_r e^{-j\beta_o L''/2} (R_1 e^{\gamma L''/2} + R_2 e^{-\gamma L''/2}) \quad (22) \end{aligned}$$

$\hat{\rho}_l$ 과 $\hat{\rho}_r$ 은 각각 왼쪽과 오른쪽 거울 면에서의 $E(z)$ 의 반사 계수이다. 식 (15)~(18)과 (21), (22)로부터 다음 식이 유도된다.

$$\begin{aligned} & \frac{e^{-\gamma(L'+L'')/2} \left(1 - \rho_l \frac{\hat{\Gamma}}{j\kappa}\right)}{\rho_l - \frac{\hat{\Gamma}}{j\kappa}} \\ & = \frac{e^{\gamma(L'+L'')/2} \left(\rho_r - \frac{\hat{\Gamma}}{j\kappa}\right)}{1 - \rho_r \frac{\hat{\Gamma}}{j\kappa}} \quad (23) \end{aligned}$$

여기서

$$\rho_l = \hat{\rho}_l e^{-j\beta_o L'} e^{j\Omega} \quad (24)$$

$$\rho_r = \hat{\rho}_r e^{-j\beta_o L''} e^{-j\Omega} \quad (25)$$

식 (14), (16), (18), (19)로부터 다음 식이 유도된다.

$$\gamma = \frac{-j\kappa}{2} \left(\frac{\hat{\Gamma}}{j\kappa} - \frac{j\kappa}{\hat{\Gamma}} \right) \quad (26)$$

식 (23)과 (26)으로부터 다음의 고유치 방정식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \gamma L &= \frac{-j\kappa L \sinh(\gamma L)}{D} \\ &\times (\rho_l + \rho_r)(1 - \rho^2) \cosh(\gamma L) \\ &\pm \frac{-j\kappa L \sinh(\gamma L)}{D} (1 + \rho^2) \\ &\times \left[(\rho_l - \rho_r)^2 \sinh^2(\gamma L) + (1 - \rho^2)^2 \right]^{1/2} \quad (27) \end{aligned}$$

여기서

$$D = (1 + \rho^2)^2 - 4\rho^2 \cosh^2(\gamma L) \quad (28)$$

$$\rho^2 = \rho_l \rho_r = \hat{\rho}_l \hat{\rho}_r e^{-j2\beta_o L} \quad (29)$$

$$L = (L' + L'')/2 \quad (30)$$

식 (27)에서 γ 를 구할 수 있으며, 이로부터 문턱에서의 이득 α 와 δ 를 구하고, δ 로부터 발진

주파수 $\omega = \frac{c\beta}{n} = \frac{c}{n}(\beta_o + \delta)$ 를 구할 수 있다.

2.2 종 방향 빔 분포

z 방향으로 빔 분포 변화를 다음과 같이 계산하였다.

식 (12)와 (13)의 $R(z)$ 와 $S(z)$ 표현식에서 R_1, R_2, S_1, S_2 의 상대적 크기를 알 수 있다. 식 (14)로부터

$$R_1 = \frac{j\kappa e^{-j\Omega} S_1}{\hat{\Gamma}} \quad (31)$$

식 (21), (17), (14)로부터

$$R_2 = \frac{1 - \rho_l \frac{\hat{\Gamma}}{j\kappa}}{\rho_l - \frac{j\kappa}{\hat{\Gamma}}} e^{-j\Omega} e^{-\gamma L'} S_1 \quad (32)$$

식 (17)과 (32)로부터

$$S_2 = \frac{j\kappa}{\hat{\Gamma}} \frac{1 - \rho_l \frac{\hat{\Gamma}}{j\kappa}}{\rho_l - \frac{j\kappa}{\hat{\Gamma}}} e^{-\gamma L'} S_1 \quad (33)$$

DFB 레이저 내 임의의 z 값에서 $R(z)$ 로 표현되는 파의 전력은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_a(z) = c \left| R_1 e^{\gamma z} + R_2 e^{-\gamma z} \right|^2 \quad (34)$$

마찬가지로 $S(z)$ 로 표현되는 파의 전력은 다음과 같다.

$$P_b(z) = c \left| S_1 e^{\gamma z} + S_2 e^{-\gamma z} \right|^2 \quad (35)$$

여기서 c 는 상수이다. 따라서 식 (31), (32), (33)을 식 (34), (35)에 대입하면, $P_a(z)$ 및 $P_b(z)$ 의 분포를 구할 수 있다. 마찬가지로 식 (31), (32), (33)을 식 (12), (13)에 대입하면 $R(z)$ 와 $S(z)$ 의 분포를 구할 수 있다.

왼쪽 거울 면에서 방사되는 전력 P_l 및 우측 거울 면에서 방사되는 전력 P_r 은 다음과 같다.

$$P_l = (1 - |\rho_l|^2)P_b \left(\frac{-L'}{2} \right) \quad (36)$$

$$P_r = (1 - |\rho_r|^2)P_a \left(\frac{L''}{2} \right) \quad (37)$$

이상과 같은 계산을 오른쪽 거울 면에서 반사가 일어나지 않도록 유전막 코팅을 하여 $\rho_r=0$ 이 되도록 한 후, ρ_l 의 위상= π 인 경우와 ρ_l 의 위상= $\pi/2$ 인 경우에 대하여 서로 비교하였다. 문턱에서 최소 이득을 필요로 하는 제 1모드에 대하여, 빔의 분포 $|R(z)|$ 와 $|S(z)|$, 그리고 방사전력비 P_l/P_r 를 구했다.

3. 시뮬레이션 결과

3.1 ρ_l 의 위상= π , $\rho_r=0$

그림 1은 κL 이 0.1에서 10까지 증가할 때 $(\alpha L, \delta L)$ 의 변화를 보여주는 그래프이다.

반사 방지 코팅을 하지 않은, 두 거울 면을 가진 1.55um의 파장을 갖는 DFB 레이저에서 κL 이 0.1에서 10까지 증가할 때 αL 이 감소하는 변화폭 크기보다[11][12], 한쪽인 오른쪽 거울 면에 무반사 코팅을 한 경우에 κL 이 0.1에서 10까지 증가할 때 αL 이 감소하는 변화폭 크기가 훨씬 크다. 즉 오른쪽 거울 면에서 반사가 일어나지 않도록 유전막 코팅을 한 경우에 훨씬 안정된 발진을 유지할 수 있다.

그림 2는 $\kappa L = 0.1$, $\kappa L = 1.0$, $\kappa L = 10$ 인 세 경우에 대하여 임의의 크기로 하여 $|R(z)|$ 와 $|S(z)|$ 를 그린 것이다.

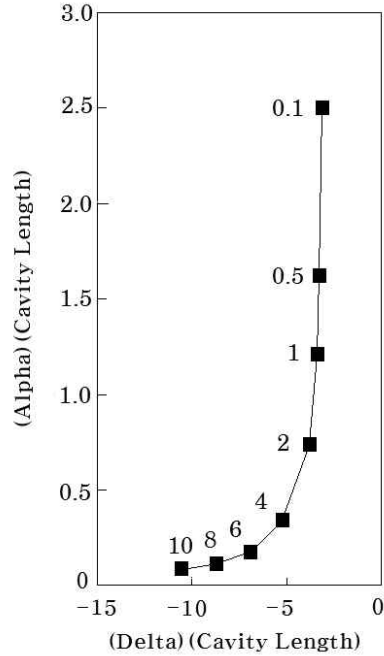
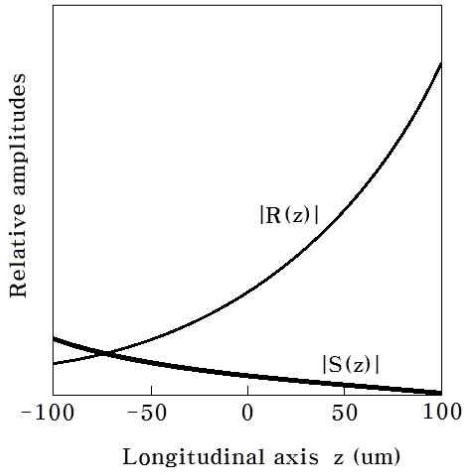


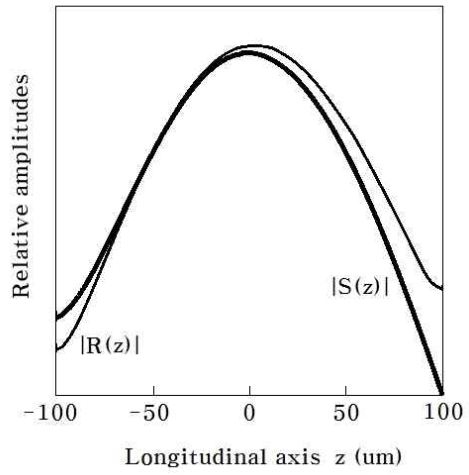
그림 1. ρ_l 의 위상= π , $\rho_r=0$ 인 경우, κL 이 증가할 때 $(\alpha L, \delta L)$ 의 변화 그래프
Fig. 1. The graph of $(\alpha L, \delta L)$ in case of ρ_l phase= π and $\rho_r=0$, as κL increases

그림에서 알 수 있는 바와 같이 $\kappa L = 0.1$ 인 경우 격자의 효과는 거의 나타나지 않음을 알 수 있다. $R(z) \sim R_1 e^{\gamma z}$ 이고 $S(z) \sim S_2 e^{-\gamma z}$ 인 변화를 보여준다. 오른쪽 거울 면에 무반사 코팅을 하였기 때문에 $|R(z)|$ 가 모두 방출되어 오른쪽 거울면에서 $|S(z)| = 0$ 이 된다.

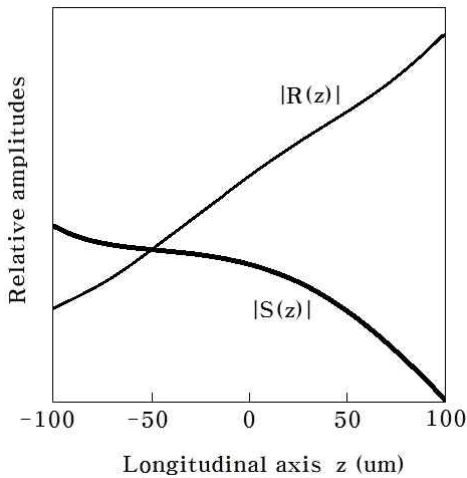
$\kappa L = 1.0$ 인 경우 격자에서 반사가 일어나는 효과가 서서히 생기기 시작하다가, $\kappa L = 10$ 인 경우 격자의 효과가 두드러져서, 거울 면에 의한 반사보다는 격자에 의한 반사가 우세하게 일어남을 보여주고 있다.



(a) $\kappa L = 0.1$



(c) $\kappa L = 10$



(b) $\kappa L = 1.0$

그림 2. ρ_l 의 위상= π , $\rho_r=0$ 인 경우, 발진 모드의 빔 분포 $|R(z)|$ 및 $|S(z)|$. (a) $\kappa L = 0.1$, (b) $\kappa L = 1.0$, (c) $\kappa L = 10$
 Fig. 2. The beam profiles of $|R(z)|$ and $|S(z)|$ of a lasing mode in case of ρ_l phase= π and $\rho_r=0$. (a) $\kappa L = 0.1$, (b) $\kappa L = 1.0$ and (c) $\kappa L = 10$

P_l/P_r 은 표 1과 같이 변화한다.

표 1. κL 에 따른 P_l/P_r 의 값

Table 1. The value of P_l/P_r as κL increases

κL	0.1	1.0	10
P_l/P_r	0.01676	0.1441	0.2844

3.2 ρ_l 의 위상= $\pi/2$, $\rho_r=0$

그림 3은 κL 이 0.1에서 10까지 증가할 때 ($\alpha L, \delta L$)의 변화를 보여주는 그래프이다.

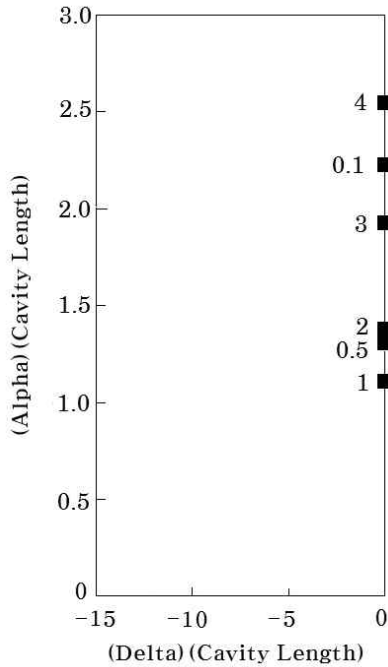
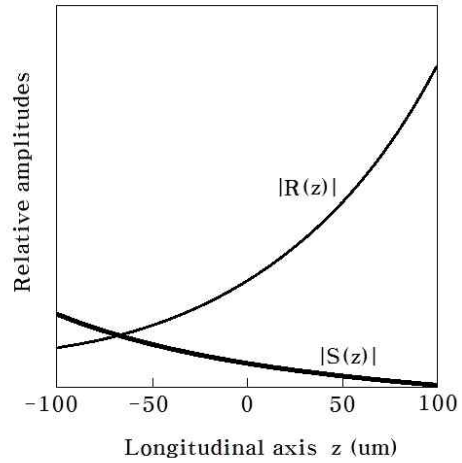


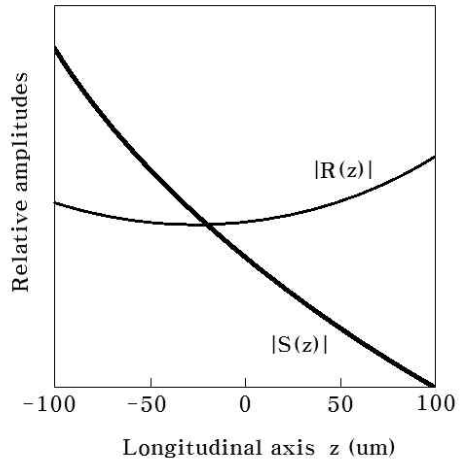
그림 3. ρ_l 의 위상= $\pi/2$, $\rho_r=0$ 인 경우, κL 이 증가할 때 $(\alpha L, \delta L)$ 의 변화 그래프
 Fig. 3. The graph of $(\alpha L, \delta L)$ in case of ρ_l phase= $\pi/2$ and $\rho_r=0$, as κL increases

그림 1에서는 κL 이 0.1에서 10까지 증가할 때 αL 이 계속 하강하였지만, 그림 3에서는 $\kappa L=0.1$ 에서 $\kappa L=1.0$ 이 되면서 αL 의 변화가 1.1 정도 하강했다가, κL 이 1.0보다 커지면 다시 αL 이 상승하는 패턴을 보인다. 따라서 발진에 필요한 문턱 이득이 제일 낮게 하기 위해서는 $\kappa L=1.0$ 이 되도록 해야 한다. 또 그림 1과는 다르게 $\delta L=0$ 이 되어 격자 주파수가 발진 주파수와 일치하는 현상이 나타남을 알 수 있다.

그림 4를 보면, $\kappa L=0.1$ 인 경우 격자의 효과는 거의 나타나지 않고 지수함수형 증가를 보여 준다. 즉 $R(z) \sim R_1 e^{\gamma z}$ 이고 $S(z) \sim S_2 e^{-\gamma z}$ 인 변화를 나타내고 있다.



(a) $\kappa L = 0.1$



(b) $\kappa L = 1.0$

그림 4. ρ_l 의 위상= $\pi/2$, $\rho_r=0$ 인 경우, 발진 모드의 빔 분포 $|R(z)|$ 및 $|S(z)|$. (a) $\kappa L=0.1$ (b) $\kappa L=1.0$

Fig. 4. The beam profiles of $|R(z)|$ and $|S(z)|$ of a lasing mode in case of ρ_l phase= $\pi/2$ and $\rho_r=0$. (a) $\kappa L=0.1$ (b) $\kappa L=1.0$

$\kappa L=1.0$ 으로 증가하면서 격자에 의한 반사가 증가함을 알 수 있다. 이것은 발진 이득의 감소를 가져온다.

P_l/P_r 은 표 2와 같이 변화한다. $\kappa L = 1.0$ 인 경우, 무반사 코팅이 된 오른쪽 거울면에서보다 왼쪽 거울면으로 더 많은 광 방출이 이루어짐을 볼 수 있다.

표 2. κL 에 따른 P_l/P_r 의 값

Table 2. The value of P_l/P_r as κL increases

κL	0.1	1.0
P_l/P_r	0.02939	1.3841

4. 결론

두 거울 면 중에 한쪽 거울 면에 무반사 코팅을 한, 1.55um의 파장을 갖는 DFB 레이저에서 굴절률 격자와 이득 격자가 동시에 존재할 때, 굴절률 격자와 이득 격자 사이의 구조와 배치 방법에 따라 발진 주파수와 발진 이득, 중 방향으로의 빔 분포 특성을 이론적으로 해석하였다. 굴절률 격자와 이득 격자가 거울 면에서 갖는 위상 값의 변화에 따라서, 그리고 $\kappa L = 0.1$, $\kappa L = 1.0$ 및 $\kappa L = 10$ 으로 증가하면서, DFB 레이저의 발진 모드에 대한 빔의 분포 $|R(z)|$ 와 $|S(z)|$, 그리고 방사전력비 P_l/P_r 를 구했다. 편의상 다음의 두 가지 경우에 대한 특성을 비교 검증하였다.

- ① ρ_l 의 위상= π , $\rho_r=0$
- ② ρ_l 의 위상= $\pi/2$, $\rho_r=0$

ρ_l 의 위상= π , $\rho_r=0$ 인 경우 $\kappa L = 1.0$ 이 될 때 부터 격자에 의한 반사 효과가 드러나기 시작함을 볼 수 있고, $\kappa L = 10$ 인 경우에는 그림 2(c)에서 보듯이 반사 효과가 매우 두드러지게 나타남을 볼 수 있다. 반사 방지 코팅을 하지 않은, 두

거울 면을 가진 1.55um의 파장을 갖는 DFB 레이저에서 κL 이 0.1에서 10까지 증가할 때 αL 이 감소하는 변화폭 크기보다[11][12], 오른쪽 거울 면에 무반사 코팅을 한 경우에 κL 이 0.1에서 10까지 증가할 때 αL 이 감소하는 변화폭 크기가 훨씬 증가하였다. 즉 오른쪽 거울 면에서 반사가 일어나지 않도록 유전막 코팅을 한 경우에 훨씬 안정된 발진을 유지할 수 있다. 낮은 문턱 전류와 높은 주파수 안정성을 얻기 위해서는, κL 을 8보다 크게 하는 것이 바람직하다.

ρ_l 의 위상= $\pi/2$, $\rho_r=0$ 인 경우에는, 그림 3에서 보듯이 $\kappa L = 0.1$ 에서 $\kappa L = 1.0$ 이 되면서 αL 의 변화가 1.1 정도 하강했다가, κL 이 1.0보다 커지면 다시 αL 이 상승하는 패턴을 보인다. 따라서 발진에 필요한 문턱 이득이 제일 낮게 하기 위해서는 $\kappa L = 1.0$ 이 되도록 해야 한다. 또한 $\delta L = 0$ 이 되어 격자 주파수가 발진 주파수와 일치하는 현상이 나타남을 알 수 있다.

참고 문헌

- [1] T.L. Koch, U. Koren, "Semiconductor lasers for coherent optical fiber communications", Journal of Lightwave Technology, vol.8, no.3, pp. 274-293, 1990. DOI: 10.1109/50.50725
- [2] H. Olesen, J. Salzman, B. Jonsson, B. Tromborg, "Single-mode stability of DFB lasers with longitudinal Bragg detuning", IEEE Photonics Technology Letters, vol.7, issue 5, pp. 461-463, 1995. DOI: 10.1109/68.384510
- [3] S.K.B. Lo, H. Ghafouri-Shiraz, "A method to determine the above-threshold stability of distributed feedback semiconductor laser diodes", Journal of Lightwave Technology, vol.13, no.4, pp.563-568, 1995. DOI: 10.1109/50.372466

[4] C.A. Ferreira Fernandes, "Stability in single longitudinal mode operation in DFB laser structures", Proceedings of the 12th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference 2004, MELECON 2004, vol.1, pp.3-6; Dubrovnik, Croatia. May, 2004. DOI: 10.1109/MELCON.2004.1346756

[5] Jing-Yi Wang, M. Cada, Jin Sun, "Theory for optimum design and analysis of distributed-feedback lasers", IEEE Photonics Technology Letters, vol.11, issue 1, pp.24-26, 1999. DOI: 10.1109/68.736378

[6] M. Okai, S. Tsuji, N. Chinone, "Stability of the longitudinal mode in lambda/4-shifted InGaAsP/InP DFB lasers", IEEE Journal of Quantum Electronics, vol.25, issue 6, pp.1314-1319, 1989. DOI: 10.1109/3.29262

[7] T. Yamanaka, S. Seki, K. Yokoyama, "Numerical analysis of static wavelength shift for DFB lasers with longitudinal mode spatial hole burning", IEEE Photonics Technology Letters, vol.3, issue 7, pp.610-612, 1991, DOI: 10.1109/68.87929

[8] G. Morthier, R. Baets, "Design of index-coupled DEB lasers with reduced longitudinal spatial hole burning", Journal of Lightwave Technology, vol.9, no.10, pp.1305-1313, 1991. DOI: 10.1109/50.90928

[9] T.K. Sudoh, Y. Nakano, K. Tada, K. Kikuchi, T. Hirata, H. Hosomatsu, "Self-suppression effect of longitudinal spatial hole burning in absorptive-grating gain-coupled DFB lasers", IEEE Photonics Technology Letters, vol.5, no.11, pp.1276-1278, 1993. DOI: 10.1109/68.250043

[10] X. Pan, H. Olesen, B. Tromborg, "Spectral linewidth of DFB lasers including the effects of spatial hole-burning and nonuniform current injection", IEEE Photonics Technology Letters, vol.2, no.5, pp.312-315, 1990. DOI: 10.1109/68.54690

[11] 권기영, 기장근, "DFB 레이저의 빔 분포 시뮬레이션과 검정", 한국소프트웨어감정평가

학회 논문지, 제15권, 제1호, pp.71-78, 2019. <http://dx.doi.org/10.29056/jsav.2019.06.08>

[12] 권기영, "한쪽 거울면의 격자 위상이 $\pi/2$ 인 DFB 레이저의 시뮬레이션과 검정", 한국소프트웨어감정평가학회 논문지, 제15권, 제2호, pp.101-109, 2019. <http://dx.doi.org/10.29056/jsav.2019.12.13>.

저자 소개



권기영(Kee-Young Kwon)

1981.2. 고려대 전자공학과 졸업
 1983.2. KAIST 전기및전자공학과 석사
 1988.2. KAIST 전기및전자공학과 박사
 1988.3.-1991.2 (주)삼성전자 기흥 반도체연구
 구소 선임연구원
 1991.3.-현재 공주대학교 공과대학 전기전
 자제어공학부 교수
 2000.3.-2001.2. Southern Methodist
 University 방문교수
 <주관심분야> 반도체, 광통신



기장근(Jang-Geun Ki)

1986.2 고려대학교 전자공학과 졸업
 1988.2 고려대학교 전자공학과 석사
 1992.2 고려대학교 전자공학과 박사
 2002.6-2003.6 Univ. of Arizona 방문교수
 2010.6-2011.8 Univ. of Arizona 방문교수
 2016.8-2017.8 Univ. of Arizona 방문교수
 1992.3-현재 : 공주대학교 공과대학 전기전
 자제어공학부 교수
 <주관심분야>통신프로토콜, 이동통신시스템