

http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2021.7.3.463

JCCT 2021-8-54

AR 코팅된 DFB 레이저에서 격자 위상의 영향

Effect of Grating Phase in DFB Lasers with an Anti-reflection Coated Mirror

권기영*†, 기장근**, 조현묵***

Kee-young Kwon*†, Jang-geun Ki**, Hyun-mook Cho***

요약 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. $\delta L > 0$ 인 경우일 때, 발진 모드에 대하여, 발진 주파수와 발진 이득의 특성을 해석했다. 좌측 거울면의 격자 위상이 π 에서부터 $\pi/2$ 씩 계속 감소할 때, 각 모드의 그래프 선들이 좌측으로 조금씩 이동한다. 발진 모드의 문턱 이득이 가장 낮은 경우는 $\kappa L = 10$ 인 경우이고, 이때 모드 선별성은 상대적으로 낮다. 모드 선별성이 우수한 경우는 $\kappa L = 0.5$ 에서부터 $\kappa L = 6$ 정도까지이고, 이 경우 주파수 안정성이 우수하다. 두 개의 벽개면을 갖는 경우와 비교하면, 한 개의 무반사면을 갖는 경우, 발진 모드의 문턱 이득이 증가하지만 모드 선별성은 2배 정도 더 우수해진다.

주요어 : DFB 레이저, 모드 선별성, 격자의 위상, 굴절률 격자, 이득 격자

Abstract In this paper, when a refractive index grating and a gain grating were simultaneously present in a DFB laser having a wavelength of 1.55 μm , a dielectric film coating was applied so that reflection did not occur on the right mirror surface, so that $\rho_r=0$. In case of $\delta L > 0$, the characteristics of the oscillation frequency and oscillation gain were analyzed. When the grating phase of the left mirror surface continues to decrease from π , the graph lines of each mode gradually shift to the left. In case of $\kappa L = 10$, the threshold gain of the oscillation mode is the lowest. In this case, the mode selectivity is relatively low. From $\kappa L = 0.5$ to $\kappa L = 6$, the mode selectivity and the frequency stability are excellent. In the case of DFB lasers with an anti-reflection coated mirror, the threshold gain of the oscillation mode increases but the mode selectivity is about twice as excellent, compared with DFB lasers of having two cleaved facets.

Key words : DFB laser, Mode selectivity, Grating phase, Index grating, Gain grating

1. 서론

나날이 기술 발전의 속도가 빨라지면서 사람 간 혹은

은 사물 간 소통하는 정보량도 폭발적으로 증가하고 있으며, 정보 이동의 속도 또한 급격하게 빨라지고 있다. 이동통신의 예를 들어보면 1984년 1세대 이동통신이 시작된

*정회원, 공주대학교 전기전자제어공학부 교수 (교신저자)
**공주대학교 전기전자제어공학부 교수 (참여저자)
***공주대학교 전기전자제어공학부 교수 (참여저자)
접수일: 2021년 5월 11일, 수정완료일: 2021년 7월 15일
게재확정일: 2021년 7월 25일

Received: May 11, 2021 / Revised: July 15, 2021

Accepted: July 25, 2021

*Corresponding Author: kky@kongju.ac.kr

Division of Electrical, Electronic and Control Engineering,
Kongju National University, Korea

이후 계속적 진화가 이루어져 2010년대에 4세대를 거쳐서 2020년대에 5세대 이동통신 상용화가 시작되었다. 스마트 기기의 수요가 폭발적인 증가를 하고 있을 뿐만 아니라 사물인터넷 단말기에 대한 수요도 폭발적으로 증가하고 있기 때문에, 현대는 대용량의 정보를 초고속으로 전달하는 것이 필수적으로 되었다. 이러한 제4차 산업혁명 시대를 맞이한 환경적인 변화는 유무선 네트워크 인프라의 구축과 함께, 초고속이면서 광대역화에 적합하도록 정보통신 설비와 소자를 개발해야만 하는 필요성을 가속화시키고 있다[1].

광대역 광통신 시스템에 사용되는 레이저 광원의 속도를 높이기 위해서는, 주파수 선택성이 우수해야 하고 동시에 주파수 동작도 안정적이어야 하면서, 고주파로 전류 변조를 할 경우에도 발진 파장의 변화가 없어야 한다. 이러한 특성을 만족시켜주는 광원으로 DFB(Distributed Feedback) 레이저가 각광을 받고 있다[2]~[6]. DFB 레이저는 결정 벽개면에서 광의 반사가 이루어지기보다는, 활성층에 혹은 클래드 층에 격자구조를 만들어 주고, 그 격자에서 발생하는 브래그(Bragg) 산란을 이용하여 광의 반사가 이루어지도록 한다. 그런데 굴절률 격자구조를 갖는 DFB 레이저는 발진 파장이 축소되는 현상이 발생하고, 또 발진 특성이 결정 벽개면에서 굴절률 격자의 위상과 결정 벽개면의 반사율에 따라 특성이 민감하게 변화하는 것이 문제이다. 이 문제를 개선하려고 반사 방지 코팅을 한 4분의 1 파장 위상 천이된 DFB 레이저가 제안되었다. 이 위상 천이된 DFB 레이저는 잔류 반사율($\ll 0.005$)이 낮아야 하고, 공간적으로 홀 버닝(spatial hole burning) 현상이 발생하는 것이 이득의 비선형성을 유발하는 것이 문제가 된다[7]~[10].

본 논문에서는 한쪽 결정 벽개면에 반사가 일어나지 않도록 유전막 코팅을 한 경우, 1.55 μm 의 파장을 갖는 DFB 레이저에서 굴절률 격자와 이득 격자가 동시에 존재할 때, ρ_l 의 위상= π 에서 ρ_l 의 위상= $-3\pi/4$ 까지 점차적으로 변화시킬 경우 발진 주파수와 발진 이득의 변화 특성을 이론적으로 해석한다. 2장에서는 해석을 위한 이론적인 바탕을 설명하고, 3장에서는 ρ_l 의 위상= π 에서 ρ_l 의 위상= $-3\pi/4$ 까지 $\pi/4$ 씩 변화시켜 가면서, 그리고 $\delta L > 0$ 인 경우일 때, DFB 레이저의 발진 모드에 대한 발진 이득과 주파수 안정성을 논의했다.

II. 이론적 배경

격자구조를 활성층 혹은 클래드 층에 제작하는데, 굴절률 격자와 이득 격자가 모두 존재하는 경우를 고려한다. 이러한 굴절률 격자와 이득 격자에 대한 식은 다음과 같이 표현할 수 있다[11].

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

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

여기에서 $n(z)$ 는 굴절률이고, $\alpha(z)$ 는 이득이다. z 는 레이저의 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 이득이며, 식 (6)의 발진 주파수 ω 는 β 를 알면 구할 수 있다.

일반성을 유지하면서 $E(z)$ 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 양의 z 방향으로 전파하는 파이고, $S(z)$ 는 음의 z 방향으로 전파하는 파이다. 식 (8)과 (3)으로 부터 다음 식을 얻는다.

$$-R' + (\alpha - j\delta)R = j\kappa e^{-j\Omega} S \quad (9)$$

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

여기서 $\delta = \beta - \beta_o$ 이고, $|\delta| \ll \beta$ 를 가정하였고, $e^{\pm j3\beta_o z}$ 를 전파하는 파는 생략하였다.

식 (9)와 (10)은 다음 식의 해를 갖는다.

$$R(z) = R_1 e^{\gamma z} + R_2 e^{-\gamma z} \quad (11)$$

$$S(z) = S_1 e^{\gamma z} + S_2 e^{-\gamma z} \quad (12)$$

여기서 R_1, R_2, S_1, S_2 는 상수이다.

식 (11)과 (12)를 식 (9)와 (10)에 대입하면 다음 식을 얻는다.

$$\widehat{\Gamma} R_1 = j\kappa e^{-j\Omega} S_1 \quad (13)$$

$$\Gamma R_2 = j\kappa e^{-j\Omega} S_2 \quad (14)$$

$$\Gamma S_1 = j\kappa e^{j\Omega} R_1 \quad (15)$$

$$\widehat{\Gamma} S_2 = j\kappa e^{j\Omega} R_2 \quad (16)$$

여기서

$$\widehat{\Gamma} = -\gamma + \alpha - j\delta \quad (17)$$

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

식 (13)~(16)은 다음 식이 만족될 때 해를 가진다.

$$\gamma^2 = (\alpha - j\beta)^2 + \kappa^2 \quad (19)$$

다음의 고유치 방정식을 얻는다.

$$\gamma L = \frac{-j\kappa L \sinh(\gamma L)}{D}$$

$$\times (\rho_l + \rho_r)(1 - \rho^2) \cosh(\gamma L)$$

$$\pm \frac{-j\kappa L \sinh(\gamma L)}{D} (1 + \rho^2)$$

$$\times \left[(\rho_l - \rho_r)^2 \sinh^2(\gamma L) + (1 - \rho^2)^2 \right]^{1/2} \quad (20)$$

여기서

$$D = (1 + \rho^2)^2 - 4\rho^2 \cosh^2(\gamma L) \quad (21)$$

$$\rho^2 = \rho_l \rho_r = \widehat{\rho}_l \widehat{\rho}_r e^{-j2\beta_o L} \quad (22)$$

$$\rho_l = \widehat{\rho}_l e^{-j\beta_o L'} e^{j\Omega} \quad (23)$$

$$\rho_r = \widehat{\rho}_r e^{-j\beta_o L''} e^{-j\Omega} \quad (24)$$

$\widehat{\rho}_l$ 과 $\widehat{\rho}_r$ 은 각각 왼쪽과 오른쪽 거울 면에서의 $E(z)$ 의 반사계수이다.

$$L = (L' + L'')/2 \quad (25)$$

식 (20)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.

III. 시뮬레이션 결과

그림 1은 우측 거울면을 무반사면으로 하여 $\rho_r = 0$ 으로 하고, 좌측 거울면의 위상이 π 인 경우, κL 이 0.1에서 10까지 증가할 때 $(\alpha L, \delta L)$ 의 변화를 보여주는 그래프이다. 그림 1에서부터 그림 8까지의 그래프는, 좌측 거울면의 위상을 π 에서부터 $\pi/2$ 씩 계속 감소시켜 가면서, κL 이 0.1에서 10까지 증가할 때 $(\alpha L, \delta L)$ 의 변화를 보여주는 그래프들이다.

$\delta L > 0$ 인 경우일 때, 좌측 거울면의 위상이 π 에서부터 $\pi/2$ 씩 계속 감소하면서, 각 모드들의 그래프 선들이 좌측으로 조금씩 이동하고 있음을 볼 수 있다.

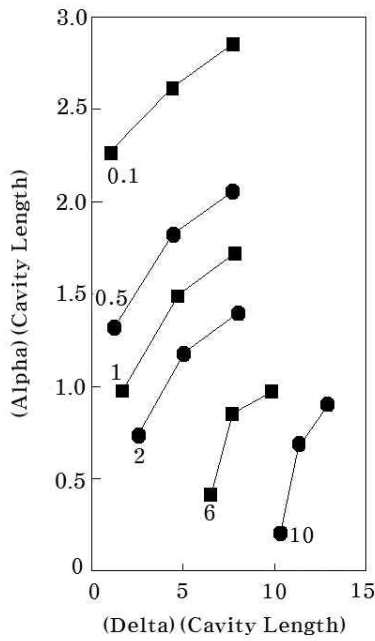


그림 1. ρ_l 의 위상= π , $\rho_r=0$ 인 경우, κL 이 증가할 때 $(\alpha L, \delta L)$ 의 변화 그래프.
Figure 1. The graph of $(\alpha L, \delta L)$ in case of ρ_l phase= π and $\rho_r=0$, as κL increases.

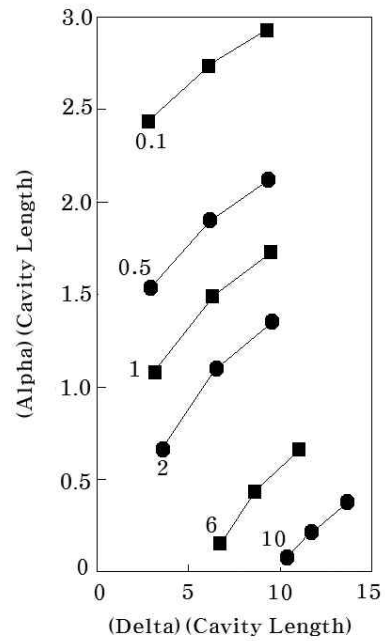


그림 3. ρ_l 의 위상=0, $\rho_r=0$ 인 경우, κL 이 증가할 때 $(\alpha L, \delta L)$ 의 변화 그래프.
Figure 3. The graph of $(\alpha L, \delta L)$ in case of ρ_l phase=0 and $\rho_r=0$, as κL increases.

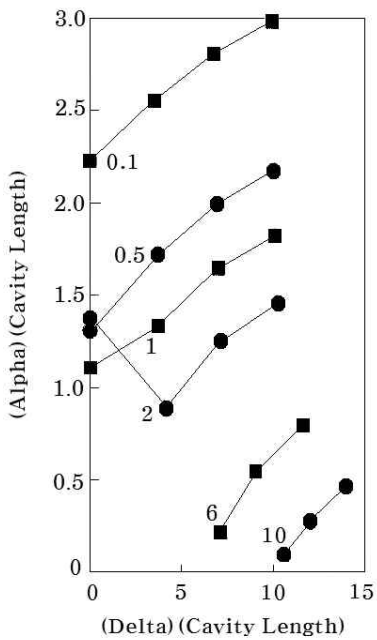


그림 2. ρ_l 의 위상= $\pi/2$, $\rho_r=0$ 인 경우, κL 이 증가할 때 $(\alpha L, \delta L)$ 의 변화 그래프.
Figure 2. The graph of $(\alpha L, \delta L)$ in case of ρ_l phase= $\pi/2$ and $\rho_r=0$, as κL increases.

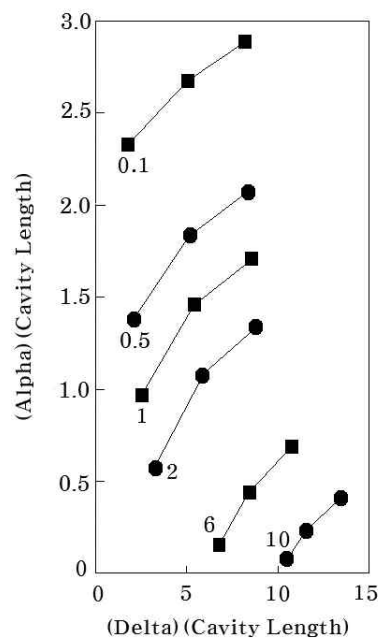


그림 4. ρ_l 의 위상= $-\pi/2$, $\rho_r=0$ 인 경우, κL 이 증가할 때 $(\alpha L, \delta L)$ 의 변화 그래프.
Figure 4. The graph of $(\alpha L, \delta L)$ in case of ρ_l phase= $-\pi/2$ and $\rho_r=0$, as κL increases.

발진 모드의 문턱 이득이 가장 낮은 경우는 $\kappa L = 10$ 인 경우이고, 이때 모드 선별성은 상대적으로 낮다. 모드 선별성이 우수한 경우는 $\kappa L = 0.5$ 에서부터 $\kappa L = 6$ 정도까지이고, 이 경우 주파수 안정성이 우수하다. 그러나 발진 모드의 문턱 이득은 $\kappa L = 10$ 인 경우보다 크다.

그림 5는 두 개의 벽개면을 갖는 경우, 우측 및 좌측 거울면의 위상이 모두 0인 경우, κL 이 0.1에서 10까지 증가할 때 $(\alpha L, \delta L)$ 의 변화를 보여주는 그래프이다 [12]. 발진 모드의 문턱 이득이 가장 낮은 경우는 $\kappa L = 10$ 인 경우이고, 우측 거울면을 무반사면으로 만든 경우와 비교할 때, 문턱 이득은 더 낮다.

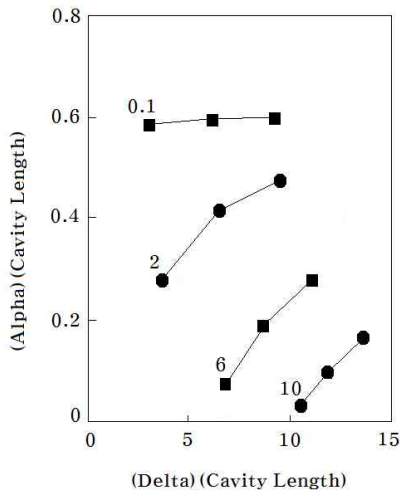


그림 5. ρ_l 의 위상=0, ρ_r 의 위상=0인 경우, κL 이 증가할 때 $(\alpha L, \delta L)$ 의 변화 그래프.
 Figure 5. The graph of $(\alpha L, \delta L)$ in case of ρ_l phase=0 and ρ_r phase=0, as κL increases.

이전 연구인 두 개의 벽개면을 갖는 경우인 그림 5와 한 개의 무반사면을 갖는 경우인 그림 1에서부터 그림 4까지의 그래프를 비교하면, 한 개의 무반사면을 갖는 경우 $\kappa L = 0.1$ 일 때 발진 모드의 문턱 이득이 약 4배 정도 증가한다. 한 개의 무반사면을 갖는 경우, $\kappa L = 2$ 이상일 때는 발진 모드의 문턱 이득이 약 2배 정도로 증가하지만, 모드 선별성이 2배 정도 더 우수하다.

IV. 결론

두 거울 면 중에 오른쪽 거울 면에 무반사 코팅을 한, 1.55um의 파장을 갖는 DFB 레이저에서 굴절률 격자와 이득 격자가 동시에 존재할 때, 굴절률 격자와 이득 격자 사이의 구조에 따라 발진 주파수와 발진 이득의 특성을 이론적으로 해석하였다.

좌측 거울면의 위상이 π 에서부터 $\pi/2$ 씩 계속 감소할 때, $\delta L > 0$ 인 경우 각 모드의 그래프 선들이 좌측으로 조금씩 이동한다. 발진 모드의 문턱 이득이 가장 낮은 경우는 $\kappa L = 10$ 인 경우이고, 이때 모드 선별성은 상대적으로 낮다. 모드 선별성이 우수한 경우는 $\kappa L = 0.5$ 에서부터 $\kappa L = 6$ 정도까지이고, 이 경우 주파수 안정성이 우수하다.

이전 연구인 두 개의 벽개면을 갖는 경우와 비교하면, 한 개의 무반사면을 갖는 경우 $\kappa L = 0.1$ 일 때 발진 모드의 문턱 이득이 약 4배 정도 증가한다. $\kappa L = 2$ 이상일 때는 한 개의 무반사면을 갖는 경우 발진 모드의 문턱 이득이 약 2배 정도 증가하지만, 모드 선별성은 2배 정도 더 우수해진다.

References

- [1] Seokyoung Kim, Kwangki Ryoo, "Research on information & communication work business in response to the fourth industrial revolution", The Journal of the Convergence on Culture Technology, vol. 5, no. 1, pp.139-146, 2019. <http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2019.5.1.139>
- [2] 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
- [3] 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
- [4] S.K.B. Lo, H. Ghafouri-Shiraz, "A method to determine the above-threshold stability of distributed feedback semiconductor laser diodes", Lightwave Technology Journal of, vol. 13, no. 4, pp. 563-568, 1995. DOI: 10.1109/50.372466
- [5] 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

- [6] C.A. Ferreira Fernandes, "Stability in single longitudinal mode operation in DFB laser structures", Electrotechnical Conference 2004. MELECON 2004. Proceedings of the 12th IEEE Mediterranean, vol. 1, pp. 3-6 Vol.1, 2004. DOI: 10.1109/MELCON.2004.1346756
- [7] 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
- [8] X. Pan, H. Olesen, B. Tromborg, "Spectral linewidth of DFB lasers including the effects of spatial hole-burning and nonuniform current injection", Photonics Technology Letters IEEE, vol. 2, no. 5, pp. 312-315, 1990. DOI: 10.1109/68.54690
- [9] G. Morthier, R. Baets, "Design of index-coupled DEB lasers with reduced longitudinal spatial hole burning", Lightwave Technology Journal of, vol. 9, no. 10, pp. 1305-1313, 1991. DOI: 10.1109/50.90928
- [10] 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
- [11] Keeyoung Kwon, Janggeun Ki, "Simulation and Examination for Beam Profile of DFB Laser", The Journal of Korea Software Assessment and Valuation Society, vol. 15, no. 1, pp. 71-78, 2019, <http://dx.doi.org/10.29056/jsav.2019.06.08>
- [12] Changseok Lee, Keeyoung Kwon, Janggeun Ki, Hyunmook Choi, "Analysis of Gain and Frequency in a DFB laser with Cleaved Facets", The Journal of Korea Software Assessment and Valuation Society, vol. 16, no. 2, pp. 117-125, 2020, <http://dx.doi.org/10.29056/jsav.2020.12.13>