논문 2020-2-13 <u>http://dx.doi.org/10.29056/jsav.2020.12.13</u>

결정 벽개면을 갖는 DFB 레이저의 이득과 주파수 분석

이창석*, 권기영***, 기장근**, 조현묵**

Analysis of Gain and Frequency in a DFB laser with Cleaved Facets

Chang-Seok Lee*, Kee-Young Kwon*** , Jang-Geun Ki**, Hyun-Mook Cho**

요 약

본 논문에서는 벽개된 두 거울 면을 갖는, 1.55um 파장인 DFB 레이저에서 이득 그레이팅과 굴절률 그레 이팅이 함께 존재할 때, 편의상 ρ_l 의 위상=0으로 고정시키고, ρ_r 의 위상을 $-\pi/2$, π , $\pi/2$, 0인 경우로 변화시킬 때, 발진 주파수와 발진 이득의 변화를 이론적으로 해석하였다. $\delta L < 0$ 인 경우, (ρ_l 의 위상=0, ρ_r 의 위상=0)인 경우에, κL 을 0.1로부터 10까지 증가시킬 때, 발진하기 위해 요구되는 발진 이득이 가장 낮은 경우는 $\kappa L = 10$ 인 경우이고, 이때 고차 모드와의 발진 이득의 차이가 커서 가장 안정된 주파수 동작을 얻 을 수 있다. $\delta L > 0$ 인 경우, (ρ_l 의 위상=0, ρ_r 의 위상= π)인 경우에, κL 을 0.1로부터 10까지 증가시킬 때, 발진하기 위해 요구되는 발진 이득이 가장 낮은 경우는 $\kappa L = 10$ 이고, 이때 고차 모드와의 발진 이득의 차 이가 커서 가장 안정된 주파수 동작을 얻을 수 있다.

Abstract

In this paper, when both the refractive index grating and the gain grating exist in a 1.55um DFB laser with two cleaved mirror facets, when the phase of ρ_l is fixed to 0 and the phase of ρ_r is changed to $-\pi/2$, π , $\pi/2$, 0, the change in frequency and oscillation gain was theoretically analyzed. In the case of $\delta L < 0$, the oscillation gain required for lasing is the lowest and the most stable frequency operation is obtained in the case of (ρ_l phase=0, ρ_r phase=0) and $\kappa L = 10$, when κL is varied from 0.1 to 10. In the case of $\delta L > 0$, when (ρ_l phase=0, ρ_r phase= π) and $\kappa L = 10$, the oscillation gain required for lasing is the lowest and the higher-order modes is large so that the most stable frequency operation is obtained.

한글키워드 : LD, DFB LD, 굴절률 격자, 이득 격자, 발진 주파수, 격자 위상 keywords : LD, DFB LD, Index Grating, Gain Grating, Lasing Frequency, Grating Phase

게재확정: 2020.12.21.

* 교신저자: 권기영(email: kky@kongju.ac.kr)

접수일자: 2020.12.06. 심사완료: 2020.12.11.

1. 서 론

나날이 기술이 발달하면서 다루는 정보량도 폭발적으로 증가하고 있고, 정보 이동속도 또한

^{*} 한밭대학교 정보통신공학과

^{**} 공주대학교 전기전자제어공학부

급격히 빨라지고 있다. 1984년부터 제1세대 이동 통신이 시작된 이후 계속 진화하여 2010년대에 제4세대를 거쳐 2020년대에는 제5세대 이동통신 의 상용화가 시작되었다. 사물인터넷 단말기가 폭발적으로 증가하고 있을 뿐 아니라 스마트 기 기가 폭증하고 있는 등 초고속 대용량의 정보 전 달 필요성은 날로 증가하고 있다. 이와 같은 제4 차 산업혁명의 환경적 변화는 유선 및 무선 네트 워크 인프라를 구축하고 정보통신 소자와 설비를 초고속 광대역화해야만 하는 필요성을 가속화시 키고 있다[1].

대역폭이 넓은 광통신 시스템에 활용되는 레 이저 다이오드의 속도를 증가시키기 위해서는, 주파수 선별성이 우수하고, 동시에 안정적인 주 파수 동작을 해야 할 뿐만 아니라 고주파로 변조 를 시키더라도 동작하는 주파수에서의 변동이 없 어야 한다. 이러한 특성을 보여주는 적합한 광원 이 DFB(Distributed Feedback) 레이저이며, 따라 서 DFB LD에 대한 관심이 날로 증가하고 있다 [2]~[6]. DFB LD는 클래드층에 혹은 활성층에 그레이팅 구조를 만들어 주고, 그 그레이팅에서 발생하는 브래그(Bragg) 산란을 이용해 광 반사 가 일어나도록 한다. 그런데 굴절률 그레이팅 결 합 DFB LD는 발진 파장에서 축퇴 현상이 발생 하고, 또 벽개된 거울 반사면에서의 그레이팅 위 상과 거울 반사면의 반사율에 따라 민감한 특성 을 보이는 것이 문제이다. 이 문제를 개선하기 위해 반사를 방지하기 위한 코팅을 하고, 1/4 파 장 만큼 천이된 위상을 갖는 DFB LD가 제안되 었으며, 이 DFB LD는 낮은 잔류 반사율을 가져 야 하고 공간적 홀 버닝(spatial hole burning) 현 상이 일어나서 이득에서 비선형성이 유발되는 문 제가 있다[7]~[10].

본 논문에서는 벽개된 두 거울 면을 갖는, 1.55um 파장을 갖는 DFB LD에서 이득 그레이 팅과 굴절률 그레이팅이 함께 존재할 때, 편의상 는 순 이득이고, 다음 관계가 성립한다.

 ρ_1 의 위상=0으로 고정시키고, ρ_r 의 위상을 -π/2, π, π/2, 0인 경우로 변화시킬 때. 발진 주파수와 발진 이득의 변화를 이론적으로 해석한 다. 2장에서 해석에 사용된 이론적인 배경을 기 술하고, 3장에서는 $\delta L < 0$ 인 경우와 $\delta L > 0$ 인 경우로 나누어, DFB LD의 발진 모드 각각에 대 한 이득과 발진 주파수를 구하고, 가장 낮은 문 턱 전류 및 주파수 안정성에 대하여 논의하겠다.

2. 이론적 배경

클래드층에 혹은 활성층에 굴절률 그레이팅과 이득 그레이팅이 모두 존재하는 경우를 고려한 다. 이 굴절률 그레이팅과 이득 그레이팅은 다음 식과 같이 표현할 수 있다[11].

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

여기에서 n(z)는 굴절률을 나타내고, $\alpha(z)$ 는 이득을 나타낸다. z는 장축 방향의 좌표이고, 한 쪽 끝이 $-\frac{L'}{2}$ 이며 다른 쪽 끝은 $\frac{L''}{2}$ 이다. 이때 만족되는 파동 방정식은 식(2)와 같다.

 $\nabla^{2} E(z,t) + k^{2}(z) E(z,t) = 0$ (2)

식 (2)의 해는 $E(z,t) = E(z)e^{j\omega t}$ 와 같은 형태 로 기술할 수 있고, 다음처럼 표현할 수 있다.

$$k^{2}(z) \approx \beta^{2} + j2\alpha\beta + 4\kappa\beta\cos(2\beta_{o}z + \Omega)$$
(3)

여기서 α는 LD가 발진하기 위한 문턱에서 갖

 $\beta_o = \frac{\pi}{\Lambda}, \quad \beta = \frac{\omega}{c}$ (4)

그리고 다음 식이 성립한다.

$$\kappa = \left(\frac{\beta}{2}\right) \left(\frac{\Delta n}{n}\right) + j \frac{\Delta \alpha}{2} \quad (5)$$

식 (4)로부터 β를 얻은 후에 발진 주파수 ω를 계산할 수 있다.

일반성을 잃지 않으면서 E(z)는 다음처럼 쓸 수 있다.

$$E(z) = R(z)e^{-j\beta_o z} + S(z)e^{j\beta_o z}$$
(6)

여기서 (+)z 방향으로 전파하는 파가 R(z)이 고, (-)z 방향으로 전파하는 파가 S(z)이다. 식 (6)과 (2)에서 다음 식을 얻을 수 있다.

$$-R' + (\alpha - j\delta)R = j\kappa e^{-j\Omega}S$$
$$S' + (\alpha - j\delta)S = j\kappa e^{j\Omega}R$$
(7)

여기서 δ = β - β₀고, |δ| ≪ β를 가정하였고, e^{± j3β₀z} 이상의 파는 생략했다. 식 (7)은 다음과 같은 해를 갖는다.

 $R(z) = R_1 e^{\gamma z} + R_2 e^{-\gamma z}$ $S(z) = S_1 e^{\gamma z} + S_2 e^{-\gamma z} \qquad (8)$

여기서 R_1 , R_2 , S_1 , S_2 는 상수이다.

식 (8)을 식 (7)에 대입하고 정리하면 아래와 같은 식을 얻는다.

$$\widehat{\Gamma}R_{1} = j\kappa e^{-j\Omega}S_{1}$$

$$\Gamma R_{2} = j\kappa e^{-j\Omega}S_{2}$$

$$\Gamma S_{1} = j\kappa e^{j\Omega}R_{1}$$

$$\widehat{\Gamma}S_{2} = j\kappa e^{j\Omega}R_{2} \qquad (9)$$

여기서 Γ 와 $\widehat{\Gamma}$ 은 다음과 같다.

$$\Gamma = \gamma + \alpha - j\delta$$
$$\widehat{\Gamma} = -\gamma + \alpha - j\delta$$

식 (9)는 다음과 같은 관계가 만족 되어야만 해를 가진다.

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

이로부터 다음과 같은 고유치 방정식을 쓸 수 있다.

$$\gamma L = \frac{-j\kappa L \sinh(\gamma L)}{D}$$
$$\times (\rho_l + \rho_r)(1 - \rho^2)\cosh(\gamma L)$$
$$\pm \frac{-j\kappa L \sinh(\gamma L)}{D} (1 + \rho^2)$$
$$\times \left[(\rho_l - \rho_r)^2 \sinh^2(\gamma L) + (1 - \rho^2)^2 \right]^{1/2} \quad (10)$$

여기서

$$D = (1 + \rho^2)^2 - 4\rho^2 \cosh^2(\gamma L)$$
$$\rho^2 = \rho_l \rho_r = \hat{\rho}_l \hat{\rho}_r e^{-j2\beta_o L}$$
$$\rho_l = \hat{\rho}_l e^{-j\beta_o L'} e^{j\Omega}$$
$$\rho_r = \hat{\rho}_r e^{-j\beta_o L''} e^{-j\Omega}$$

 $\hat{\rho}_l$ 과 $\hat{\rho}_r$ 은 각각 왼쪽 반사 거울 면과 오른쪽 반사 거울 면에서 E(z)의 반사 계수를 뜻한다. L'과 L''의 평균이 $L \subseteq L = (L' + L'')/2$ 인 관 계를 갖는다.

식 (10)으로 부터 γ 를 계산할 수 있고, 이로부 터 다시 문턱에서 갖는 이득 α 및 δ 를 구하고, δ 를 구한 후에는 $\omega = \frac{c\beta}{n} = \frac{c}{n} (\beta_o + \delta)$ 를 사용 하여 발진 주파수를 구할 수 있다.

- 119 -

3. 시뮬레이션 결과

3.1 *δL* < 0인 경우

그림 1은 (ρ_l의 위상=0, ρ_r의 위상=-π/2)인 경우에, κL을 0.1로부터 10까지 증가시킬 때 (αL, δL)의 변화를 나타낸 그래프다. 발진하기 위해 요구되는 발진 이득이 가장 낮은 경우는 κL = 10이고, 이때 고차 모드와의 발진 이득의 차이도 커서 안정된 주파수 동작을 얻을 수 있음 을 알 수 있다.





그림 2는 (ρ_l의 위상=0, ρ_r의 위상=π)인 경우 에, κL을 0.1로부터 10까지 증가시킬 때 (αL, δL)의 변화를 나타낸 그래프다. 그림 1의 (ρ_l의 위상=0, ρ_r의 위상=-π/2)인 경우와 비교 하면, 발진하기 위해 요구되는 발진 이득이 가장 낮은 경우는 κL=10이고, 이때 고차 모드와의 발진 이득의 차이도 커서 안정된 주파수 동작을 얻을 수 있다는 경향에는 변함이 없다. 그러나 모드가 전반적으로 시계 방향으로 약간 회전하는 변화가 있음을 알 수 있다.





Fig. 2. $(\delta L < 0)$: The graph of $(\alpha L, \delta L)$ in case of ρ_l phase=0 and ρ_r phase= π , as κL increases.

그림 3은 (ρ_l 의 위상=0, ρ_r 의 위상= $\pi/2$)인 경 우에, κL 을 0.1로부터 10까지 증가시킬 때 ($\alpha L, \delta L$)의 변화를 나타낸 그래프다. (ρ_l 의 위상 =0, ρ_r 의 위상= $-\pi/2$)인 경우와 비교하면, 발진 하기 위해 요구되는 발진 이득이 가장 낮은 경우 는 $\kappa L = 10$ 이고, 이때 고차 모드와의 발진 이득 의 차이도 커서 안정된 주파수 동작을 얻을 수 있다는 경향에는 변함이 없다. 그러나 그림 2보 다 더, 모드가 전반적으로 시계 방향으로 회전하 는 변화가 있음을 알 수 있다.





Fig. 3. $(\delta L < 0)$: The graph of $(\alpha L, \delta L)$ in case of ρ_l phase=0 and ρ_r phase= $\pi/2$, as κL increases.

그림 4는 (ρ_l 의 위상=0, ρ_r 의 위상=0)인 경우 에, κL 을 0.1로부터 10까지 증가시킬 때 ($\alpha L, \delta L$)의 변화를 나타낸 그래프다. (ρ_l 의 위상 =0, ρ_r 의 위상= $-\pi/2$)인 경우와 비교하면, 발진 하기 위해 요구되는 발진 이득이 가장 낮은 경우 는 동일하게 $\kappa L = 10$ 이고, 이때 고차 모드와의 발진 이득의 차이도 커서 안정된 주파수 동작을 얻을 수 있다. 그러나 고차 모드와의 발진 이득 의 차이가 그림 1~3의 어떤 경우보다 커서 가장 안정된 주파수 동작을 얻을 수 있음을 알 수 있 다. 이때 안정된 주파수 동작을 얻기 위한 κL 의 범위는 $\kappa L \geq 2$ 을 만족시켜야 함을 알 수 있다.



그림 4. (δL < 0) : ρ_l의 위상=0, ρ_r의 위상=0인 경우, κL이 증가할 때 (αL, δL)의 변화 그래프.

Fig. 4. $(\delta L < 0)$: The graph of $(\alpha L, \delta L)$ in case of ρ_l phase=0 and ρ_r phase=0, as κL increases.

3.2 $\delta L > 0 인 경우$

그림 5는 (ρ_l의 위상=0, ρ_r의 위상=-π/2)인 경우에, κL을 0.1로부터 10까지 증가시킬 때 (αL, δL)의 변화를 나타낸 그래프다. 발진하기 위해 요구되는 발진 이득이 가장 낮은 경우는 κL=10이다. 그러나 고차 모드와의 발진 이득 의 차이가 커서 안정된 주파수 동작을 얻으려면 κL이 2에서 6 사이의 값을 가져야 함을 알 수 있다.



그림 5. $(\delta L > 0)$: ρ_l 의 위상=0, ρ_r 의 위상= $-\pi/2$ 인 경우, κL 이 증가할 때 $(\alpha L, \delta L)$ 의 변화 그래프. Fig. 5. $(\delta L > 0)$: The graph of $(\alpha L, \delta L)$ in case of ρ_l phase=0 and ρ_r phase= $-\pi/2$, as κL increases.

그림 6은 $(\rho_l \circ)$ 위상=0, $\rho_r \circ)$ 위상= π)인 경우 에, κL 을 0.1로부터 10까지 증가시킬 때 $(\alpha L, \delta L)$ 의 변화를 나타낸 그래프다. 그림 5의 $(\rho_l \circ)$ 위상=0, $\rho_r \circ)$ 위상= $-\pi/2$)인 경우와 비교 하면, 발진하기 위해 요구되는 발진 이득이 가장 낮은 경우는 $\kappa L = 10$ 이고, 이때 고차 모드와의 발진 이득의 차이도 커서 안정된 주파수 동작을 얻을 수 있다. 그러나 고차 모드와의 발진 이득 의 차이가 그림 5, 7 및 8의 어떤 경우보다 커서 가장 안정된 주파수 동작을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 이때 안정된 주파수 동작을 얻기 위한 κL 의 범위는 $\kappa L \geq 5$ 을 만족시켜야 함을 알 수 있다.



그림 6. $(\delta L > 0)$: ρ_l 의 위상=0, ρ_r 의 위상= π 인 경우, κL 이 증가할 때 $(\alpha L, \delta L)$ 의 변화 그래프.



그림 7은 (ρ_l의 위상=0, ρ_r의 위상=π/2)인 경 우에, κL을 0.1로부터 10까지 증가시킬 때 (αL, δL)의 변화를 나타낸 그래프다. (ρ_l의 위상 =0, ρ_r의 위상=-π/2)인 경우와 비교하면, 발진 하기 위해 요구되는 발진 이득이 가장 낮은 경우 는 κL = 10이다. 그러나 고차 모드와의 발진 이 득의 차이가 커서 안정된 주파수 동작을 얻으려 면 κL이 2에서 6 사이의 값을 가져야 함을 알 수 있다.

그림 8은 (ρ_l의 위상=0, ρ_r의 위상=0)인 경우 에, κL을 0.1로부터 10까지 증가시킬 때 (αL, δL)의 변화를 나타낸 그래프다. (ρ_l의 위상 =0, ρ_r의 위상=-π/2)인 경우와 비교하면, 매우 비슷한 특성을 보여준다. 즉 발진하기 위해 요구 되는 발진 이득이 가장 낮은 경우는 κL = 10이 지만, 고차 모드와의 발진 이득의 차이가 커서 안정된 주파수 동작을 얻으려면 κL이 2에서 6 사이의 값을 가져야 함을 알 수 있다.





4. 결 론

본 논문에서는 벽개된 두 거울 면을 갖는, 1.55um 파장을 갖는 DFB LD에서 이득 그레이 팅과 굴절률 그레이팅이 동시에 존재할 때, 편의 상 ρ_l의 위상=0으로 고정시키고, ρ_r의 위상을 -π/2, π, π/2, 0인 경우로 변화시킬 때, 발진 주파수와 발진 이득의 상관 변화를 이론적으로 해석하였다.





Fig. 8. $(\delta L > 0)$: The graph of $(\alpha L, \delta L)$ in case of ρ_l phase=0 and ρ_r phase=0, as κL increases.

 $\delta L < 0 \mbox{0} \mbox{3} \mbox{$\epsilon, $($\rho_l$^{}$)} \mbox{$\ensuremath{\mbox{$\ensuremath{\mbox{$\ensuremath{\mbox{$\ensuremath{\mbox{$\mbo\$\mbox{$\mbo\$\mbox{$\mbox{$\mbox{$\mb\$\mbox{$\mbox{$\mbox{$$

 $\delta L > 0 인 경우, (\rho_l 의 위상=0, \rho_r 의 위상=π)$ 인 경우에, κL 이 0.1부터 10까지 커질 때, 발진 하기 위해 요구되는 발진 이득이 가장 낮은 경우 는 $\kappa L = 10$ 이고, 이때 고차 모드와의 발진 이득 의 차이가 가장 커서 안정된 주파수 동작을 얻을 수 있다. (ρ_l 위상=0, ρ_r 위상=π)인 경우에, 고 차 모드와의 발진 이득의 차이가 커서 가장 안정 된 주파수 동작을 얻을 수 있고, 이때 $\kappa L \ge 5$ 가 되어야 한다.

참 고 문 헌

- 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: https://doi.org/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, 11. vol. 1999. DOI: issue 1, 24-26, pp. https://doi.org/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: https://doi.org/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: https://doi.org/10.1109/68.384510
- [6] C.A. Ferreira Fernandes, "Stability in

single longitudinal mode operation in DFB laser structures", Electrotechnical MELECON Conference 2004. 2004. Proceedings of the 12th IEEE Mediterranean, vol. 1, pp. 3-6 Vol.1, 2004. https://doi.org/10.1109/MELCON. DOI: 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: https://doi.org/ 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: https://doi.org/ 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: https://doi.org/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: https://doi.org/ 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

저 자 소 개



이창석(Chang-Seok Lee)

1996.2 KAIST 전기및전자공학과 박사 1986.2-1998.3 ETRI 연구원 1998.4-현재 : 한발대학교 정보통신공학과 교수 <주관심분야> 화합물반도체 소자 및 응용



권기영(Kee-Young Kwon)

1988.2. KAIST 전기및전자공학과 박사 1988.3.-1991.2 ㈜삼성전자 기흥 반도체연구 소 선임연구원 1991.3.-현재 공주대학교 공과대학 전기전자 제어공학부 교수 2000.3.-2001.2. Southern Methodist University 방문교수 <주관심분야> 화합물반도체 소자, 광통신



기장근(Jang-Geun Ki)

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



조현묵(Hyun-Mook Cho)

1995.2 고려대학교 전자공학과 박사 2005.8-2006.7 Georgia Tech. 방문교수 2015.8-2016.7 Georgia Tech. 방문교수 1995.9-현재 공주대 공과대학 전기전자제어 공학부 교수 <주관심분야> 집적회로설계, 고속신호인터 페이스IC, PLL & CDR, RFIC