

DFB-LD의 DC와 AC 특성 분석

正會員 김 호 진*, 안 상 호*, 엄 진 섭*

Modeling for DC & AC Characteristics of DFB-LD

Hojin Kim*, Sang-ho Ahn*, Jinseob Eom* *Regular Members*

※본 논문은 1996년도 교육부 반도체분야 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

요 약

본 논문에서 수행된 DFB(distributed feedback)-LD(laser diode)의 DC와 AC 특성 분석을 위한 모델링은 레이저 다이오드 공진기 내의 spatial hole burning과 $\lambda/4$ 위상천이 된 회절 격자의 영향을 고려한 것으로서 DC특성 분석을 위한 시뮬레이션을 통하여 공진기내의 광파워 분포와 캐리어 밀도 분포 그리고 광-전류 곡선 등을 얻었으며, AC 특성 분석을 위한 시뮬레이션으로부터는 비교적 정확한 IM 응답과 FM의 위상과 크기 응답을 얻었다.

ABSTRACT

In this paper, modeling for DC and AC characteristics analysis of DFB-LD was performed considering effects of $\lambda/4$ -shifted grating and spatial hole burning within a laser diode cavity. From the simulation for DC characteristics, Light-Current curve, optical power distribution and carrier density distribution within the cavity can be obtained. The simulation for AC characteristics provides IM response and the amplitude and phase response of FM with excellent accuracy.

I. 개 요

광통신은 세계적으로 추진중인 초고속 정보통신망의 중추로서, 앞으로 실현될 광대역 정보통신망(B-ISDN)의 추세에 비추어 볼 때, 다양한 서비스를 수용하며 막

대한 정보량을 전송하기 위해서는 광전송의 고속화 및 대용량화가 필요하다.⁽¹⁾ 고속화를 위해서는 채널당 10Gbps 이상의 고속동작이 요구되며, 대용량화를 위해서는 고속 채널들의 WDM(Wavelength Division Multiplexing)을 통하여 100Gbps 이상의 전송용량을 확보할 수 있는 초고속 광대역 WDM 광통신 시스템이 요구된다.⁽²⁾ 이러한 WDM 시스템을 구현하기 위해서는 각 채널마다 서로 다른 단일 파장을 안정적으

*강원대학교 전자공학과
論文番號:97470-1227
接受日字:1997年 12月 27日

로 공급하고 가능하면 좁은 선풍을 나타내는 광원의 개발이 매우 중요시된다. 이러한 광원 개발의 측면에서 볼 때 DFB-LD(Distributed-Feedback Laser Diode)는 WDM 광통신 시스템에 가장 적합한 광원으로서, 안정적이며 고정된 단일 파장으로 발진하며, 좁은 선풍을 지닌 DFB-LD 개발을 위해서는 먼저 소자의 설계를 위한 모델링의 기술 축적이 선행되어야만 한다. DFB-LD에 대한 이론적인 분석 및 모델링은 WDM 시스템에서 요구되는 광원들의 설계변수들을 제공할 수 있으며, 이를 바탕으로 최적의 소자 설계 및 제작이 이루어 질 수 있다.

본 시뮬레이션을 통한 모델링은 WDM 광통신 시스템의 각 채널의 광원으로서 사용되는 DFB-LD의 모델링을 통하여 단일 파장을 안정적으로 공급하고 최소 선풍을 제공하며, 고속 동작 특성을 얻기 위한 설계 파라미터들의 요구 조건의 추출을 목적으로 한다.

본 모델링은 fundamental matrix를 이용한 DFB-LD의 한계조건, 정특성, 동특성의 모델링을 통하여 이루어진 것으로서 한계조건 특성 분석으로부터 여러 개의 축 모드들의 한계 조건을 결정하여 주요 발진 모드를 결정하였으며, 이 때에 얻어진 발진 모드를 dc 특성 분석에 이용하여 광파워-전류 곡선과 발진 파장-전류 특성 그리고 레이저내의 광파워 분포와 캐리어 밀도 분포를 얻었으며, 주어진 DC 바이어스 하에서의 동적 AC 특성 분석을 통하여 DFB-LD의 FM과 IM 특성들을 얻었다.

본 논문의 구성은 II장에서 시뮬레이션에서 고려된 DFB-LD의 구조를 보여주고 III장에서는 시뮬레이션에 도입된 기본적인 이론에 관하여 알아본다. 그리고 IV장에서는 시뮬레이션을 통한 결과를 분석하고 마지막으로 V장에서 결론을 맺는다.

II. 레이저 다이오드의 구조

본 모델링을 위한 시뮬레이션에서는 DFB-LD내의 spatial hole burning의 효과를 파악하기 쉽도록 다수의 작은 세그먼트들로 나눈 DFB-LD 구조와 $\lambda/4$ 만큼 회절 격자의 위상이 천이된 DFB-LD의 구조를 동시에 고려하였는데, 이 때의 구조 각각에 대하여 살펴보자.

먼저 $\lambda/4$ 위상천이 된 DFB-LD의 구조를 살펴보면

다음의 그림 1과 같다.

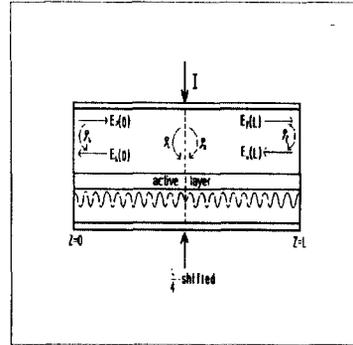


그림 1. $\lambda/4$ 위상천이 된 DFB-LD의 구조
Fig. 1 Structure of $\lambda/4$ -shifted DFB-LD

DFB-LD내의 회절 격자는 일 차($M=1$)인 것으로 가정을 하였고, 이때 DFB-LD의 정 중앙에서 회절 격자의 위상을 $\lambda/4$ 만큼 천이시킨 구조를 도입하였다. DFB-LD의 중심 부분인 $\lambda/4$ 위상천이 된 회절 격자 부분을 자세히 살펴보면 그림 2와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 $\lambda/4$ 위상천이 된 구조는 $\lambda/2$ 만큼 중심에서 주름 회절 격자 위상을 천이시킨 것과 같음을 알 수 있다.⁽³⁾

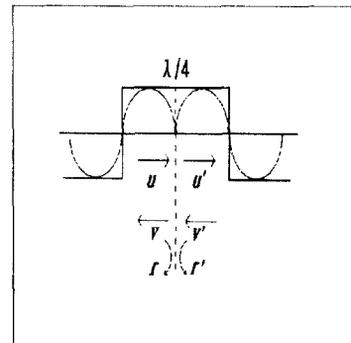


그림 2. $\lambda/4$ 위상천이 된 회절 격자
Fig. 2 $\lambda/4$ -shifted grating

본 모델링에서는 위와 같은 DFB-LD의 구조와 DFB-LD내의 spatial hole burning 현상을 잘 알 수 있

도록 DFB-LD를 다수의 작은 세그먼트들로 나누어서 생각을 하였으며, 이를 아래의 그림 3에 나타내었다.

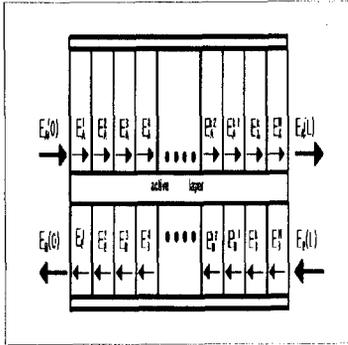


그림 3. 다수의 작은 세그먼트들로 나누어진 DFB-LD
Fig. 3 DFB-LD divided by a lot of small segments

DFB-LD의 단면에서 회절 격자가 어떠한 위상을 가지고 시작되었는가에 따라 DFB-LD의 특성이 달라질 수 있기 때문에 회절 격자의 시작 위상이 중요하다.⁽⁴⁾⁽⁵⁾ 이 점을 고려하여 수행된 시뮬레이션에서는 DFB-LD를 약 40개의 작은 세그먼트들로 나누었으며, 작은 세그먼트들 각각은 회절 격자 주기의 정수 배로 정하여 DFB-LD의 양단면에서 회절격자의 위상이 동일한 구조를 사용하였다. 사실상 DFB-LD의 제작에 있어서 DFB-LD의 양단면에서 회절 격자의 위상을 정확히 맞추어 LD를 제작하는 것은 현재로서는 거의 불가능하나, 제조 기술이 급속도로 발전하고 있으므로 가까운 미래에 제작이 가능한 것으로 생각한다. 이렇게 양단면에서 회절 격자의 위상이 동일하지 않는 경우를 생각하여 시뮬레이션 프로그램에서는 회절 격자의 위상과 주기를 통해서 DFB-LD의 길이를 고려할 수 있도록 하였다.⁽⁶⁾

본 모델링에서 고려한 작은 세그먼트들 각각의 입출력 파들 간의 관계는 fundamental matrix를 사용하여 나타내었으며, 이러한 입출력 파들 간의 관계는 다음과 같이 표현될 수 있다.⁽⁷⁾⁽⁸⁾

$$\begin{bmatrix} E_A(0) \\ E_B(0) \end{bmatrix} = [F(N, B, \lambda)] \begin{bmatrix} E_A(\Delta z) \\ E_B(\Delta z) \end{bmatrix}, \quad \Delta z \gg \Lambda \quad (1)$$

여기서 $F(N, B, \lambda)$ 는 fundamental matrix를 나타내며, 캐리어 밀도 N 과 자연 방사 재결합 B 와 파장 λ 의 함수로 주어진다. 입력측의 진행파 중에서 $E_A(0)$ 는 $z=0$ 에서의 순방향 진행파를 나타내고, $E_B(0)$ 는 $z=0$ 에서의 역방향 진행파를 나타낸다. 반면 출력측의 진행파 중에서 $E_A(\Delta z)$ 는 $z=\Delta z$ 에서의 역방향 진행파를 나타낸다. 이때 위에서 보여진 각 세그먼트들에 대해서 다음과 같은 fundamental matrix의 요소들을 유도 적용하였다.

$$\begin{aligned} F_{11} &= [\cosh(\gamma \Delta z) + \frac{i \Delta \beta}{\gamma} \sinh(\gamma \Delta z)] \exp(i \beta_B \Delta z) \\ F_{12} &= [-\frac{\chi}{\gamma} \sinh(\gamma \Delta z) \exp(-i \phi)] \exp(-i \beta_B \Delta z) \\ F_{21} &= [-\frac{\chi}{\gamma} \sinh(\gamma \Delta z) \exp(i \phi)] \exp(i \beta_B \Delta z) \\ F_{22} &= [\cosh(\gamma \Delta z) - \frac{i \Delta \beta}{\gamma} \sinh(\gamma \Delta z)] \exp(-i \beta_B \Delta z) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 ϕ 는 회절 격자를 sin 함수로 나타내었을 때, 세그먼트의 왼쪽 면 즉, $z=0$ 에서의 회절 격자의 위상이며, 이때 얻은 출력측의 진행파는 연속된 다음 세그먼트의 입력파로 사용된다. 그림 4에서와 같이 전단의 세그먼트 출력은 다음 단 세그먼트의 입력으로 들어가므로, $z=0$ 와 $z=L$ 인 DFB-LD 양단면에서의 입출력 파들 간의 관계는 $z=0$ 에서 $z=L$ 까지 Δz 의 간격으로 존재하는 모든 세그먼트의 fundamental matrix

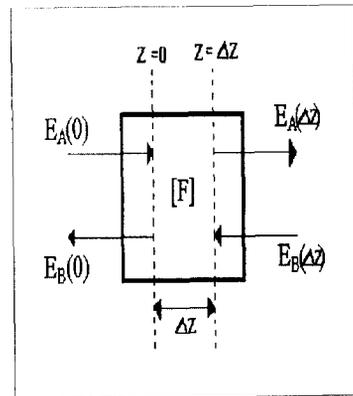


그림 4. 작은 세그먼트의 입출력 상황
Fig. 4 Input & output state of a small segment

를 차례로 곱한 것으로 표현될 수 있으며, 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} E_A(0) \\ E_B(0) \end{bmatrix} = [F_0][F_{\Delta z}] \cdots [F_L] \begin{bmatrix} E_A(L) \\ E_B(L) \end{bmatrix} \quad (3)$$

III. 기본 이론

1. Spatial Hole Burning 효과

Longitudinal spatial hole burning 또는 axial hole burning이란 레이저 다이오드의 발진 모드와 공진기 안에서 비선형 분포를 가지는 광파워의 세기 사이에서 발생되어지는 현상이다. 즉, DFB-LD의 두 모드 동작 경향과 함께 Bragg 파장으로부터 발진 파장의 변화가 생기는 현상을 말한다.

TE 모드의 결합 계수가 TM 모드보다 크므로 인해서 DFB-LD의 두 모드 동작 경향에서 우세한 발진 모드는 TE0 모드가 되고 이러한 이유로 본 모델링에서는 TE0 모드만을 고려하겠다. 먼저 두 모드 동작의 발생 과정을 살펴보면, 레이저 다이오드에 한계 전류 이상으로 전류를 주입하여 레이저 다이오드내의 빛의 세기를 증가시키면, 레이저 다이오드내에서 길이 방향으로 빛의 분포는 불균일하게 된다. 레이저의 활성층 내에서 광 세기가 높다는 것은 그 지점에서의 유도 재결합이 많이 일어난다는 것을 의미하고, 이는 그 곳에서의 캐리어 밀도가 상대적으로 낮은 것을 의미한다. 이로 인하여 레이저 다이오드 내에서 길이 방향으로 공간적으로 굴절률이 변화되고, 이 변화는 발진 모드에 영향을 미치게 되어 발진 파장의 변화를 가져오게 된다.

결론적으로 레이저내의 광 세기의 불균일한 분포가 발진파장의 변화를 가져오는 현상으로서 DFB-LD를 이용하는데 단점으로 작용하게 되므로 해서 longitudinal spatial hole burning 효과를 없애는 방안이 몇 가지 제시되어왔다. 이러한 방법으로는 레이저 공진기 안에서의 광 세기 분포를 균등하게 하는 방법과 캐리어 결핍을 보상하는 방법 즉, 캐리어가 부족한 부분에 캐리어를 보상해 주는 방법 등이 있다.⁽⁹⁾

2. 결합 파동 방정식 및 캐리어 비율 방정식

DFB-LD를 해석하는 데에 있어서 일반적으로 전계

에 대한 해석은 결합 파동 방정식이 사용되지만, 결합 파동 방정식만으로는 spatial hole burning과 같은 비선형 특성을 고려하기 힘들다. 비선형 현상이 고려되지 않은 레이저 다이오드의 해석은 실제 소자의 특성을 예측하는데 있어서 정확성이 부족하게 된다.

Spatial hole burning 현상이 고려되지 않은 DFB-LD 모델링에서는 캐리어의 농도와 광파워가 공진기 내에서 일정한 것으로 가정하지만, DFB-LD를 많은 세그먼트로 나눈 본 모델링의 경우는 각 세그먼트 내에서만 캐리어 농도와 광 세기는 균일하다고 가정을 하며, 이러한 가정을 바탕으로 각 세그먼트 내에서 광 세기와 캐리어 비율 방정식을 이용하여 캐리어 농도를 구한다. 그리고 구해진 캐리어 농도를 이용하여 fundamental matrix를 계산하고, 각 세그먼트에 해당하는 fundamental matrix들의 연속적인 곱을 통하여 DFB-LD의 오른쪽 단면에서의 입출력파를 얻는다. 이들을 오른쪽 단면에서의 경계 조건에 대입하면 파장과 왼쪽 단면에서의 입출력파를 함수로 하는 방정식을 얻을 수 있다.

결합 파동 방정식을 이용하면 DFB 구조 내에서 회절 격자에 의해서 선택적으로 피드백되는 파들을 결정할 수 있다. 결합 파동 방정식에 근거한 DFB 구조에 대한 해석은 다음과 같은 시뮬변 파동 방정식으로부터 시작한다.

$$\Delta^2 E + \epsilon(x, y, z) k_0^2 E = 0 \quad (4)$$

위 식의 해는 $E(z, t) = E(z) e^{i\omega t}$ 의 형태로 나타낼 수 있고, 여기서 $k_0 = \omega/c$ 이며, ω 는 모드 주파수이다. 식(4)에서 $\epsilon(x, y, z)$ 는 상대유전율로서 회절격자가 길이 방향인 z방향으로 주기적인 구조이기 때문에 z의 함수가 되며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\epsilon(x, y, z) = \epsilon(x, y) + \Delta\epsilon(x, y, z) \quad (5)$$

만약, $\Delta\epsilon$ 이 존재하지 않는 경우 식(4)의 일반해는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$E(x, y, z) = U(x, y) [Ae^{-i\beta z} + Be^{+i\beta z}] \quad (6)$$

그러나 상대적 유전율 변동치 $\Delta\epsilon$ 가 존재할 경우 식

(4)에서 A와 B는 Bragg 회절에 의해서 z의 함수가 된다. 이때 U(x, y)는 약한 변동인 Δε에 의해서 영향을 받지 않으며, A와 B는 z방향으로 천천히 변한다고 가정한다. Δε는 회절 격자의 주기 Λ를 가지는 주기 함수이므로 다음과 같이 Fourier급수로 확장할 수 있다.

$$\Delta\epsilon(x, y, z) = \sum \Delta\epsilon_i(x, y) \exp[i(2\pi/\Lambda) lz] \quad (7)$$

결합 상수 κ는 순방향 진행과 역방향 진행과간의 결합 정도를 나타내는 결합 계수 (coupling coefficient)로서 κ가 실수일 때는 인텍스 결합을 나타내고 허수일 때는 이득 결합을 나타내며, 복소수일 때는 인텍스와 이득 결합을 모두 포함하는데 이는 다음과 같이 주어진다.

$$\chi = \frac{k_0^2}{2\beta} \frac{\iint \Delta\epsilon(x, y, z) U^2(x, y) dx dy}{\iint U^2(x, y) dx dy} \quad (8)$$

exp(±iβz)의 양변 계수들을 같게 한 다음 위상 정합된 항들만을 모으면 다음과 같은 결합 파동 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{dA}{dz} &= \chi \exp[i(2\Delta\beta z - \phi)] B + gA \\ \frac{dB}{dz} &= \chi \exp[-i(2\Delta\beta z - \phi)] A - gB \end{aligned} \quad (9)$$

위 식에서 φ는 왼쪽 단면에서의 회절 격자 위상이며 sin φ의 형태로 정의되고, g는 이득을 나타낸다. 여기서 E_A와 E_B를 각각 순방향과 역방향으로 진행하는 파라고 하면

$$\begin{aligned} E_A(z) &= A(z) \exp(-i\beta z) \\ E_B(z) &= B(z) \exp(+i\beta z) \end{aligned} \quad (10)$$

이때, 식(10)을 식(9)에 대입하여 정리하면,

$$\begin{aligned} E_A(z) &= [c_1 \exp(\Gamma_1 z) + c_2 \exp(\Gamma_2 z)] \exp[(g-i\beta)z] \\ E_B(z) &= \{ \exp[-i(2\Delta\beta z - \phi)] / \chi \} * \\ & [c_1 \exp(\Gamma_1 z) + c_2 \exp(\Gamma_2 z)] \exp[-(g-i\beta)z] \end{aligned} \quad (11)$$

로 표현된다. 여기서 c₁과 c₂는 임의의 상수이며, Γ_{1, 2}는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Gamma_1 &= i\Delta\beta - \gamma, \quad \Gamma_2 = i\Delta\beta + \gamma \\ \gamma^2 &= \chi^2 - (\Delta\beta)^2 \end{aligned} \quad (12)$$

한편 Δβ는 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta\beta(z) = \beta - \beta_B = \frac{2\pi n}{\lambda} - \beta_B \quad (14)$$

n은 유효 굴절률 n_e와 굴절률 변화분 Δn으로 나뉘고, Δn는 다시 실수 부분과 허수 부분으로 나뉘어 다음과 같이 표시된다.

$$n = n_e + \Delta n_r + j\Delta n_i \quad (15)$$

따라서 Δβ를 정리하면 다음과 같다.

$$\Delta\beta(z) = \frac{2\pi n_e}{\lambda} - \beta_B + \Gamma \Delta\gamma - 0.5j \alpha_{int} \quad (16)$$

Bragg 주파수는 β_B = Mπ/Λ로 표현되고, Δβ는 굴절률의 변화로 인하여 Bragg 주파수로부터 얼마나 변동이 되었는가를 나타낸다. 본 모델링에서는 일차의 회절 격자를 적용하여 M = 1이다. 한편 Δγ는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\gamma = \frac{2\pi}{\lambda} (\Delta n_r + j\Delta n_i) = \Delta\gamma_r + j\Delta\gamma_i \quad (17)$$

$$\Delta\gamma_r = -0.5 \alpha_{tw}(a(\lambda)N(z) - b(\lambda)) \quad (18)$$

$$\Delta\gamma_i = [a(\lambda)N(z) - b(\lambda)] [1 - \epsilon(I_f + I_b)] \quad (19)$$

여기서 α_{tw}는 선폭 개선 인자이고, a(λ)는 파장의 함수로서, 이득의 캐리어 농도에 대한 변화의 기울기를 나타낸다. 또한 ε는 비선형 이득 계수이고, I_f와 I_b는 각각 순방향과 역방향 진행과의 파워를 나타내는 것으로 다음과 같이 주어지며,

$$I_{f, b} = \iint \frac{1}{2Z_{char}} |E_{f, b}|^2 dx dy \quad (20)$$

Z_{char}는 특성 임피던스이다.⁽⁶⁾⁽¹⁰⁾

공진기 내에서의 캐리어 농도와 광파워(즉 I_f, I_b)가

길이 방향의 함수이기 때문에 $\Delta\beta$ 도 길이 방향의 함수가 된다. 이처럼 공진기 내에서의 캐리어 밀도와 E_A, B 가 길이 방향의 함수인 것을 언급된 바와 같이 longitudinal spatial hole burning이라고 한다. 공진기 내에서의 캐리어 밀도의 변화는 공진기의 각 위치에서의 광파워를 고려한 캐리어 비율 방정식에 의해서 구할 수 있으며 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{dN(z)}{dt} = A N^3(z) + B N^2(z) + \frac{N(z)}{\tau} + \frac{\Gamma[a(\lambda)N(z) - b(\lambda)][1 - \epsilon P(z)] P(z)}{h\nu dw} = 0 \quad (21)$$

여기서

$$P(z) \propto |E_A(z)|^2 + |E_B(z)|^2 \quad (22)$$

이며, A 는 Auger 재결합 계수, B 는 이 분자 재결합 계수, τ 는 캐리어 수명, Γ 는 활성층 안에서의 파워 구속 인자, d 는 활성층의 두께, w 는 스트라이프 폭이다.

3. 한계 특성과 DC 특성 분석

Spatial hole burning을 고려한 $\lambda/4$ 위상전이 된 DFB-LD의 문턱 이득(한계 전류 또는 문턱 전류)과 그때의 발진파장을 구하기 위해서는 DFB-LD의 중심에서 각각 양 단면의 방향으로 본 반사 계수 ρ_L 과 ρ_R 은 그 곱이 1이 되어야 한다는 한계 조건을 고려하여야 하며 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\rho_L(\lambda, I_{th}) \rho_R(\lambda, I_{th}) - 1 = 0 \quad (23)$$

여기서 ρ_L 은 중심에서 왼쪽 단면을 향한 유효 반사율이고 ρ_R 은 중심에서 오른쪽 단면을 향한 유효 반사율을 나타내는데, 한계 조건을 구하기 위해서는 식 (23)을 만족하는 λ, I_{th} 를 구하여야 하며, 이 중에서 가장 작은 I_{th} 를 요구하는 λ 값이 한계 전류에서의 발진 파장으로서 DC 특성 분석을 할 때에 초기치로서 사용된다. 그리고 한계 전류에서의 발진 파장과 그때의 사이드 모드의 파장은 한계 전류 이상으로 전류가 공급될 때의 SMSR(side mode suppression ratio)를 구하기 위한 시뮬레이션의 초기치로 사용된다.

한계 전류의 이상의 전류가 공급되었을 때 DFB-LD의 오른쪽 단면인 $z=L$ 에서의 경계 조건을 구하면 다음과 같다.

$$E_B(L)(\lambda, E_B(0)) - \rho_L E_A(L)(\lambda, E_B(0)) = 0 \quad (24)$$

여기서 $E_B(0)$ 는 DFB-LD의 왼쪽 단면 내부에서 밖으로 나가는 파를 나타낸다.

수행한 시뮬레이션에서는 한계 전류이상에서의 발진 파장을 구하기 위해서, 한계 전류에서의 발진 파장과 임의의 $E_B(0)$ 를 초기치로 사용하여 식(24)의 경계 조건을 만족하는 발진 파장 및 $E_B(0)$ 를 Newton Rapson 방법을 사용하여 구하였다. Newton Rapson 방법을 살펴보기 위해서 식(23)의 경계 조건을 다음과 같은 형태의 방정식으로 변형하면 다음과 같이 주어지며,

$$U[\lambda, E_B(0)] + iV[\lambda, E_B(0)] = 0 \quad (25)$$

경계 조건을 만족하는 해인 λ_r 과 $E_{Br}(0)$ 에 관한 방정식을 Newton Rapson 방법을 이용하여 풀면 다음과 같다.

$$\lambda_r = \lambda + \frac{V[\lambda, E_B(0)] \frac{\partial U}{\partial E_B(0)} - U[\lambda, E_B(0)] \frac{\partial V}{\partial E_B(0)}}{\frac{\partial U}{\partial \lambda} \frac{\partial V}{\partial E_B(0)} - \frac{\partial V}{\partial \lambda} \frac{\partial U}{\partial E_B(0)}} \quad (26)$$

$$E_{Br}(0) = E_B(0) + \frac{V[\lambda, E_B(0)] \frac{\partial U}{\partial \lambda} - U[\lambda, E_B(0)] \frac{\partial V}{\partial \lambda}}{\frac{\partial U}{\partial \lambda} \frac{\partial V}{\partial E_B(0)} - \frac{\partial V}{\partial \lambda} \frac{\partial U}{\partial E_B(0)}} \quad (27)$$

본 모델링에서는 각 세그먼트의 fundamental matrix의 입력파 E_B 의 제곱 즉, $|E_B|^2$ 은 DFB-LD 내에서의 광 세기의 분포를 나타내며, 각 세그먼트의 캐리어 농도로부터 전체 공진기 내에서의 캐리어 밀도 분포를 구할 수 있다. 한편 식(24)를 만족하는 $E_B(0)$ 를 이용하여 전류 변화에 따른 양쪽 단면에서의 출력 광파워를 계산할 수 있다.

본 모델링을 위한 시뮬레이션의 과정은 먼저, 한계 조건 분석을 통하여 가장 작은 I_{th} 를 요구하는 한계

전류에서의 발진 파장 λ 를 구하고, 구해진 한계 전류에서의 발진 파장과 임의의 $E_B(0)$ 를 한계 조건 이상에서의 발진 파장을 구하기 위한 초기치로 사용한다. 이러한 초기치를 이용하여 우선 $z=0$ 부터 차례로 각각의 세그먼트에서의 캐리어 밀도 및 fundamental matrix를 계산한다. 캐리어 밀도를 계산할 때에 오차의 한계를 10^{-7} 정도로 하여 좀 더 정확한 계산을 수행하였다. 계산된 각각의 캐리어 밀도는 각각의 fundamental matrix를 계산하는데 사용되고, 계산된 모든 fundamental matrix의 곱으로부터 $z=L$ 에서의 입출력 파들이 계산된다. 이들을 경계 조건에 대입하여 조건이 만족되면 초기치로 주어진 발진 파장과 $E_B(0)$ 가 해가 된다. 그러나 조건을 만족시키지 못할 때에

4. AC 특성 분석

본 시뮬레이션에서는 DC 특성 분석에서 얻은 값들을 바탕으로 AC 특성 분석을 수행함으로써, AC 특성 분석에서도 spatial hole burning을 고려하여 LD를 작은 세그먼트로 나누었으며, DC 특성 분석과 마찬가지로 Fundamental matrix와 Newton Rapson 방법을 사용하였다. 또한 DC 특성 분석의 각 세그먼트에서의 값들을 정적 상태의 값으로 사용을 하였으며, $N(z)$ 와 γ , $\Delta\beta$ 등도 DC 특성 분석의 값들을 그대로 적용하였다.

AC 특성 분석에 있어서 기본적인 진행 파동 방정식에 DC 특성 분석의 정적 상태의 해에 소신호가 부과된 다음의 식들을 도입한다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta \phi_F}{\partial z} + \frac{j\Omega}{v_g} \Delta \phi_F + \frac{1}{v_g} \Delta \omega &= -\frac{\Delta r_B}{r_{F0}} |K_{FB}| \cos(\phi_{FB} + \phi_{B0} - \phi_{F0}) \\ &+ \frac{r_{B0}(z)}{r_{F0}(z)} |K_{FB}| [\Delta \phi_B - \Delta \phi_F] \sin(\phi_{FB} + \phi_{B0} - \phi_{F0}) \\ -\frac{\partial \Delta \phi_B}{\partial z} + \frac{j\Omega}{v_g} \Delta \phi_B + \frac{1}{v_g} \Delta \omega &= -\frac{\Delta r_F}{r_{B0}} |K_{BF}| \cos(\phi_{BF} + \phi_{F0} - \phi_{B0}) \\ &+ \frac{r_{F0}(z)}{r_{B0}(z)} |K_{BF}| (\Delta \phi_F - \Delta \phi_B) \sin(\phi_{BF} + \phi_{F0} - \phi_{B0}) \end{aligned}$$

이러한 소신호 결합 파동 방정식으로부터 F-matrix 를 유도하였으며, AC 특성에 사용되는 경계조건은 다음과 같다.

AC 특성 분석의 시뮬레이션에서도 기존의 논문들 보다 정확한 결과를 얻기 위해서 캐리어 밀도 계산과 경계조건 만족 여부를 계산할 때에 오차의 한계를 10^{-7} 정도가 될 수 있도록 노력하였다.

IV. 시뮬레이션 결과 분석

본 시뮬레이션의 결과들은 모두 레이저 다이오드의 길이를 약 $300.05\mu m$ 이고 κL 의 값을 2로 해서 얻은 것들이다.

$$\begin{aligned} \Delta r_F(0, \Omega) &= |\rho_b| \Delta r_B(0, \Omega) \\ \Delta r_B(L, \Omega) &= |\rho_f| \Delta r_F(L, \Omega) \\ \Delta \phi_A(0, \Omega) &= 0 \\ \Delta \phi_B(L, \Omega) &= \Delta \phi_F(L, \Omega) + 2m\pi \quad (m=0, \pm 1, \pm 2 \dots) \\ \Delta \phi_B(0, \Omega) &= 0 \end{aligned} \tag{31}$$

그림 5는 양쪽 반사 계수가 모두 제로일 때 $\lambda/4$ 위상 천이 된 DFB-LD와 $\lambda/4$ 위상천이 되지 않은 DFB-LD 에서 회절 격자의 $\lambda/4$ 위상천이가 한계 전류에 미치는 영향을 보여주고 있는 것으로써, 회절 격자의 위상이 $\lambda/4$ 만큼 천이된 경우 주 모드가 더 낮은 이득에서 생김을 알 수 있다. 다음 그림 6은 DFB-LD의 양쪽 반사 계수를 서로 다르게 하여, 왼쪽 단면은 0.32, 오른쪽 단면은 제로인 경우로써, 회절 격자의 시작 위상에 따른 $\lambda/4$ 위상천이된 DFB-LD의 한계 특성을 나타낸 것으로 시작 위상은 그림의 하단에 나타냈다,

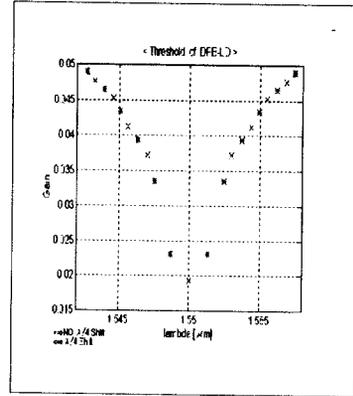


그림 5. $\lambda/4$ 위상천이가 미치는 영향
Fig. 5 $\lambda/4$ -shifted effects

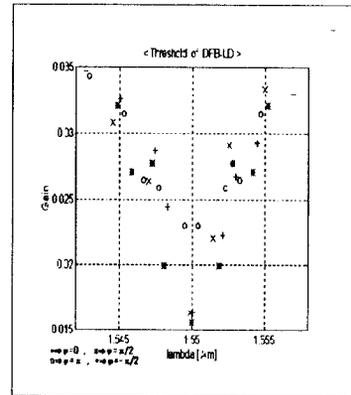


그림 6. 회절 격자의 시작 위상이 미치는 영향
Fig. 6 Starting phase effects of grating

위의 결과 그림을 보면 시작 위상이 π 인 경우는 단일 모드가 아닌 두 개의 모드가 양쪽에 대칭적으로 생김을 확인 할 수 있다. 시뮬레이션의 결과에서도 알 수 있는 바와 같이 회절 격자의 처음 시작 위상이 어떠한가에 따라서 DFB-LD의 특성이 많은 차이가 남에 따라, 회절 격자의 시작 위상 결정도 DFB-LD 제작에 있어서 상당히 중요한 요소임을 알 수 있다.

그림 7은 양쪽의 반사 계수가 모두 제로인 경우의 L-I 곡선과 왼쪽 단면은 0.32, 오른쪽 단면은 zero로 반사 계수를 다르게 했을 경우의 L-I곡선을 함께 나타낸 것이다. 위의 그림을 통해서 알 수 있는 바와 같

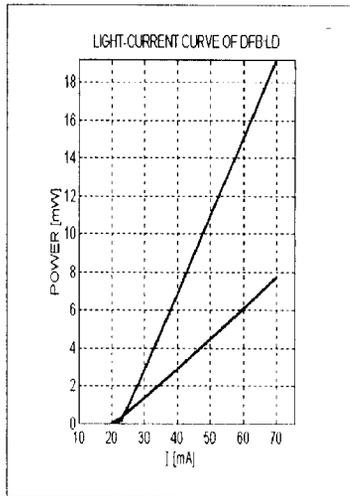


그림 7. 광파워-전류 곡선
Fig. 7 Light-Current curve

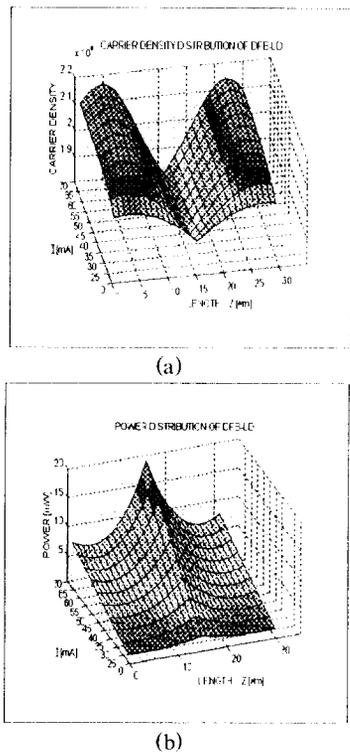


그림 8. (a) 캐리어 밀도 분포 (반사 계수가 모두 0)
(b) 광파워 분포 (반사 계수가 모두 0)
Fig. 8 (a) Carrier density distribution (Reflectivities of facets are zero)
(b) Power distribution (Reflectivities of facets are zero)

이 전류를 약 70mA까지 나타내었을 때, 반사 계수를 서로 달리한 경우가 출력 광파워가 더 높음을 알 수 있으며 LD에서 나오는 광파워는 한계 전류 이상의 공급되는 전류에 비례함을 알 수 있다.

그림 8의 (a)와 (b)는 양쪽 반사 계수를 모두 제로로 한 경우 DFB-LD 내의 캐리어 밀도 분포와 광파워 분포를 25mA에서 70mA까지의 공급되는 전류에 따라서 나타낸 그림이다. 캐리어 밀도는 전류가 공급되는 DFB-LD의 중앙을 중심으로 양쪽이 거의 대칭적이고 DFB-LD의 중앙 부분이 가장 낮은 밀도로 분포됨을 알 수 있으며, 이와는 대조적으로 DFB-LD의 광파워 분포는 중앙 부분이 가장 파워가 높고 양쪽으로 갈수록 줄어드는 것을 알 수 있다. 가운데를 중심으

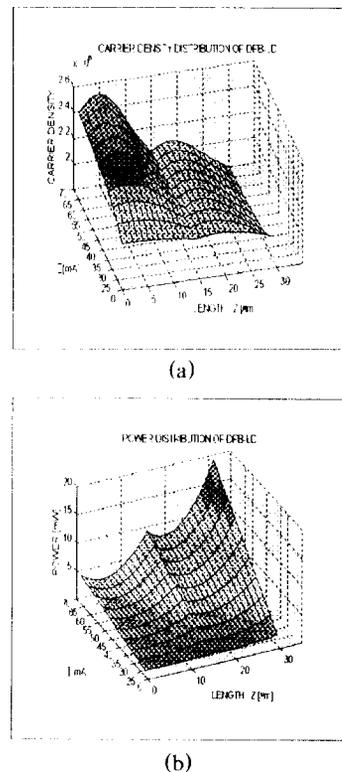
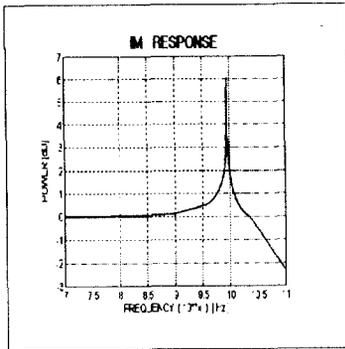


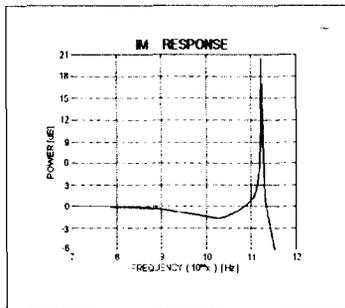
그림 9. (a) 캐리어 밀도 분포 (반사 계수가 서로 다른 경우)
(b) 광파워 분포 (반사 계수가 서로 다른 경우)
Fig. 9 (a) Carrier density distribution (Reflectivities of facets are different)
(b) Power distribution (Reflectivities of facets are different)

로 좌우로 대칭인 것은 양 단면의 반사 계수가 모두 제로이기 때문에 양 단면으로 광파워가 같은 형태로 나가는 것에서 기인하며, DFB-LD의 중앙 부분에서 광파워가 높고 캐리어 밀도가 낮은 것은 이 부분에서 재결합이 가장 많이 일어나는 것을 의미한다. 물론 반사 계수가 제로인 경우는 이상적인 경우로서 실제에는 적용을 할 수 없으나, 뒤에서 나타낼 반사 계수가 다른 경우와 비교를 해 본다면 spatial hole burning 효과에 대해서 좀 더 면밀히 파악할 수 있을 것으로 사료된다.

그림 9(a)와 (b)는 양쪽의 반사 계수가 다를 때 공급 전류의 변화에 따른 캐리어 밀도 분포와 광파워의 분포를 보여주고 있다. 왼쪽의 반사 계수가 0.32이기 때문에 왼쪽 단면 근처에 적은 양의 광파워가 존재함을

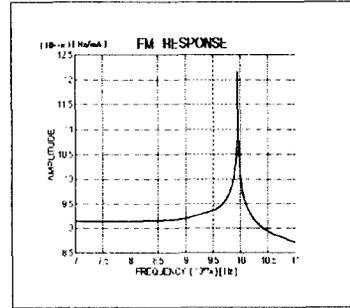


(a)

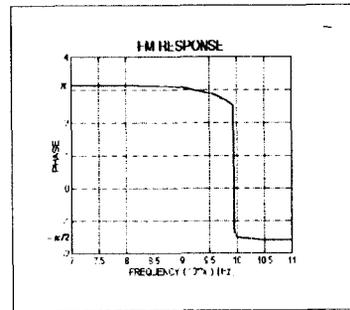


(b)

그림 10. (a) IM 응답 (반사 계수가 모두 0)
 (b) IM 응답 (반사 계수가 서로 다른 경우)
 Fig. 10 (a) IM response (Reflectivities of facets are zero)
 (b) IM response (Reflectivities of facets are different)



(a)



(b)

그림 11. (a) FM 응답 (크기) (반사 계수가 모두 0)
 (b) FM 응답 (위상) (반사 계수가 모두 0)
 Fig. 11 (a) FM response (amplitude) (Reflectivities of facets are zero)
 (b) FM response (phase) (Reflectivities of facets are zero)

알 수 있고, 이에 상응하여 캐리어의 유도 재결합이 오른쪽 단면에 비하여 왼쪽에서 상대적으로 적게 일어나게 되며 캐리어가 왼쪽 단면에 더 많이 몰려 있는 것을 알 수 있다. 또한 공급되는 전류가 많아지면 캐리어 밀도가 증가함에 따라서 캐리어가 왼쪽 단면에 더 많이 몰리게 됨을 알 수 있다.

그림 10은 AC 특성 분석을 통해 $I=40\text{ mA}$ 이고 반사 계수는 양쪽이 모두 제로인 경우와 반사 계수가 서로 다른 경우의 IM 응답 곡선을 보여주고 있는 것으로 써 파워는 데시벨로 나타나 있다. 반사 계수가 양쪽이 모두 제로인 경우는 변조 주파수는 약 10^{10} [Hz]정도 인 것을 알 수 있으며, 반사 계수가 양쪽이 서로 다른 경우는 변조 주파수가 10^{10} [Hz]보다 높은 곳에서 나타남을 알 수 있다. 그림 11은 양쪽의 반사 계수가 모

두 zero이고, $I = 40\text{mA}$ 인 경우 FM 응답의 크기와 위상의 응답 곡선을 나타낸 것이다. 위의 결과를 통해 FM 응답이 IM 응답과 동일한 주파수인 약 10^{10} [Hz] 부근에서 전류의 변조에 의하여 캐리어들과 광자들이 주기적인 진동을 함으로써 생기는 처핑을 볼 수 있는데, 이러한 처핑은 디바이스의 구조와 파장에 따라 변한다. 또한 처핑이 일어나는 동일한 주파수에서 위상 변하는 것을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 Spatial hole burning을 고려한 /4 위상천이 된 DFB-LD를 모델링 하기 위해서 결합 파동방정식과 캐리어 농도 비율 방정식을 분석하였고, DFB-LD를 매우 많은 세그먼트로 나누어 각각의 세그먼트에 fundamental matrix를 적용하였다. 양단면에서의 진행파들간의 적절한 경계 조건을 유도하여 이로부터 공진기 내에서의 광파워 분포, 캐리어 분포 등과 같은 DC 특성을 얻었다. 이러한 DC 특성 분석 값을 바탕으로 하여 AC 특성 분석을 행하였으며, FM 응답의 진폭과 위상 변조 그리고 IM 응답을 얻을 수 있었다.

시뮬레이션을 통한 결과를 살펴보면, 한계 전류는 약 19mA 정도 그리고 발진 파장은 약 $1.55073\mu\text{m}$ 정도를 얻었다. DC 특성 분석을 통해서 반사 계수와 진류에 따른 광파워 분포와 캐리어 밀도의 분포를 얻었으며, 이때에 한쪽의 단면의 반사 계수를 크게 함으로써 반대쪽으로 많은 파워가 출력됨을 알 수 있었다. 이러한 결과를 통하여 광파워 분포와 캐리어 밀도의 분포가 DFB-LD내에서 위치에 따라 변하는 것을 알 수 있었다. 또한 AC 특성 분석을 통해서 변조 주파수가 약 $10^{10}\sim 10^{11}$ [Hz]부근에 있음을 알 수 있었다.

요약하면, 시뮬레이션을 통하여 공진기 내부에서의 캐리어 농도 및 광파워가 위치에 따라 변하는 spatial hole burning을 확인할 수 있었으며, 한계 전류 이상에서의 DC 특성 분석을 수행을 통해서 L-I 곡선을 얻을 수 있었다. 또한, AC 특성 분석을 통해서 FM 응답의 진폭과 위상 변조, 그리고 IM 응답을 얻을 수 있었으며, 이러한 결과들을 통해서 본 모델링이 전체적으로 잘 이루어졌음을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. S. Fujita, N. Henmi, I. Takano, M. Yamaguchi, T. Torikai, T. Suzuki, S. Takano, H. Ishihara, M. Shihada, "A 10 Gb/s-80km optical fiber transmission experiment using a directly modulated DFB-LD and a high speed InGaAs-APDs," *OFC'88*, New Orleans, LA, 1988, post deadline paper.
2. J.L. Gimlett, M.Z. Iqbal, J. Young, L. Curtis, R. Spicer, N.K. Cheng, and S. Tsuji, "11 Gb/s optical transmission experiment using 1540nm DFB laser with non-return-to-zero modulation and pin/HEMT receiver," *Electron. Lett.*, vol. 25, pp. 596, 1989.
3. K. Utaka, S. Akiba, K. Sakai, and Y. Matsushima, " $\lambda/4$ -shifted InGaAsP/InP DFB lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-22, pp. 1042, 1986.
4. Y. Itaya, K. Wakita, G. Motosugi, and T. Ikegami, "Phase control by coating in $1.56\mu\text{m}$ distributed feedback lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-21, pp. 527, 1985.
5. H. Nagai, T. Matsuoka, Y. Noguchi, Y. Suzuki, and Y. Yoshikumi, "InGaAsP/I distributed feedback buried heterostructure lasers with both facets cleaved structure," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-21, pp. 450, 1986.
6. P. Vankwikelberge, G. Morthier, and R. Baets, CLADISS "A Longitudinal Multimode Model for the Analysis of the Static, Dynamic, and Stochastic Behavior of Diode Lasers with Distributed Feedback", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 26, NO. 10, 1990.
7. M. Yamada, and K. Sakuda, "Analysis of almost-periodic distributed feedback slab waveguide via a fundamental matrix approach," *Applied Optics*, vol. 26, no. 16, 3474, 1987.
8. G. Bjork and O. Nissson, "A New Exact and Efficient Numerical Matrix Theory of Complicated Laser Structures: Properties of Asymmetric Phase-Shifted DFB Lasers", *Journal of Lightwave Technology* vol. LT-5, NO. 1, 1987.
9. W. S. Rabinovich and B. J. Feldman, "Spatial Hole

Burning Effects in Distributed Feedback Laser”,
 IEEE J. Quantum Electron., vol. 25, NO. 1, 1989.

10. P. Szczepanski, “Approximate analysis of non-linear operation of a distributed feedback laser,” *Applied Optics.*, vol. 24, no. 21, pp. 3574, 1985.
11. P. Vankwikelberge, F. Buytaert, A. Franchois, R. Beets, P.I. Kuindersma, and C.W. Fredriksz, “Analysis of the carrier-induced FM response of DFB lasers: Theoretical and experimental case studies,” *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 25, no. 11, pp. 2239, 1989.



김 호 진(Hojin Kim) 정회원
 1972년 2월 28일생
 1997년 2월: 강원대학교 전자공학과 졸업(공학사)
 1997년 2월~현재: 강원대학교 전자공학과 석사과정
 ※주관심분야: 광통신, 광소자
 e-mail: hojin@optics.kangwon.ac.kr

안 상 호(Sang-ho Ahn) 정회원
 1967년 10월 3일생
 1993년 2월: 강원대학교 전자공학과 졸업(공학사)
 1995년 2월: 강원대학교 전자공학과 대학원 졸업(공학석사)
 1995년 2월~현재: 강원대학교 전자공학과 박사과정
 ※주관심분야: 광통신, 광소자
 e-mail: beat@optics.kangwon.ac.kr

엄 진 섭(Jinseob Eom) 정회원
 1959년 2월 20일생
 1982년 2월: 서울대학교 전자공학과 졸업(공학사)
 1984년 2월: 서울대학교 전자공학과 대학원 졸업(공학석사)
 1990년 12월: 미국 texas A&M 대학 전기공학과 대학원 졸업(공학박사)
 1984년~1985년: 금성반도체(주) 연구원
 1985년~1987년: 한국통신 전임연구원
 1991년~1992년: 한국통신 전임연구원
 1992년~현재: 강원대학교 전자공학과 조교수
 ※주관심분야: 광통신, 광소자, 광교환
 e-mail: jeom@cc.kangwon.ac.kr