

여러 가지 형태의 DFB 유형 레이저의 ASE 스펙트럼 모델링과 파라미터 추출

김민년^{1*}, 채규수¹

Parameter extraction using the ASE spectrum Modelling for various DFB-type LDs

Min-Nyun Kim^{1*} and Gyoo-Soo Chae¹

요약 본 논문은 DFB(Distributed Feed-Back) 구조를 갖고 있는 레이저의 성능을 ASE(Amplified Spontaneous Emission)을 이용하여 예측하고자 한다. 설계 후 제작된 레이저의 구조 파라미터 오차를 파괴적이 방법을 사용하지 않고 문턱전류이하에서 방출되는 ASE 스펙트럼을 통해 예측할 수 있다. ASE 스펙트럼은 격자 주기, 두께, 결합계수, 손실, 유전율 등의 구조 파라미터 정보를 포함하고 있다. 본 논문은 구조 파라미터가 발생시키는 ASE 스펙트럼 발생을 모델링한 후 출력된 스펙트럼을 통해 구조 파라미터를 추출하는 프로그램을 개발하여 시뮬레이션하였다.

Abstract We present simulation results for a method designed to extract key parameter values of DFB-type LDs based on ASE spectrum measurements. Comparisons were made between the given (actual) and the extracted (estimated) parameters, as well as the associated spectra, for a variety of DFB-type LDs, and the two sets of results were found to be in excellent agreement.

Key Words : Distributed Feed-Back(DFB), Amplified Spontaneous Emission(ASE), Laser Diode(LD), Grating structure, coupling coefficient

1. 서론

현재까지 수행된 DFB 유형소자에 대한 연구에 의하면, 이들의 성능은 결합계수, 격자의 위상, 단면의 반사율, 각 section의 길이 등의 구조 파라미터 수치에 상당한 영향을 받는다고 알려져 있다[1]. 그러나 이러한 구조 파라미터의 값들은 공정과정에서의 오차 및 복잡한 내부 dynamics 때문에 설계된 DFB 레이저가 제작된 후와 발생하는 오차로 인해 그 성능을 측정을 통한 수치의 추출이 요구되는 상황이다. DFB 유형 소자를 문턱전류 미만에서 동작시킬 때 발생하는 ASE의 스펙트럼은 이러한 차원에서 구조 파라미터들에 대한 매우 풍부한 정보를 함유하고 있다고 과거에 발표된 연구논문들은 주장하고 있으며 [2]-[6] 이 점을 활용하기위한 노력이 지속적으로 진행되고있는 상태이다. 현재까지 발표된 DFB 레이저의 ASE 스펙트럼에 관련된 내용은 대부분 특정한 종류의 구조만을 다루었거나, 측정된 스펙트럼으로부터의 구조

파라미터 추출과정에 관한 내용이 미흡하였거나, 또는 일반적인 구조를 다루는 과정에 있어서 오류가 포함되어있었다 [2],[3],[5]. 따라서 본 논문에서는 이와 같은 단점들을 보완하여 다양한 종류의 DFB 유형 소자에서의 보다 현실적인 ASE 스펙트럼을 제시할 수 있는 이론적 모델 [7]을 정립하고 이를 바탕으로 신뢰성있는 파라미터 구조의 추출기법을 도안하고자 했고 이와같은 노력을 통하여 앞으로 DFB 유형 소자의 설계 및 제작과정의 향상뿐만 아니라 비 파괴적인 방법으로 이미 제작된 소자들의 성능평가 예측도 기대하는 바이다.

2. 본론

본 논문에서는 결합모드방정식 (coupled mode equations) 이론과 전달행렬기법 (transfer matrix method: TMM)을 바탕으로 임의의 DFB 유형 구조에서 문턱이득 값 미만의 일정한 이득을 주었을 경우 이 구조의 양 측면에서 발생하는 ASE 스펙트럼을 적분 형태로 유도, 표현하였다. 그리고 이와 같은 결과를 흔히 사용되는 몇 가지

¹천안대학교 정보통신학부

^{1*}교신저자: 김민년(myki@cheonan.ac.kr)

구조에 적용하여 모델을 신뢰성을 입증하였다. 단, 축 방향에서의 carrier 및 이득분포의 비 균일성 (nonuniformity) 및 이에 따른 spatial hole burning 등의 2 차적인 (secondary) 효과는 모델에 포함하지 않았으며 매질 이득 (material gain)의 파장의존도 역시 아직은 고려 되지 않은 상태이다. 그리고 자연방출로 인한 guided mode로의 결합의 정도 역시 단순한 임의의 결합상수로 처리하였다. ASE와 구조파라미터의 연관성을 이용하여 일반적인 DFB-type 레이저로부터 구조 파라미터를 추출 하는 알고리즘을 제시하고 검증을 하였다.

2.1 가정

본 논문의 ASE 모델에서는 선형 해석을 지향하였다. 즉, 문턱 전류 미만에서의 동작을 대상으로 했기 때문에, 이득의 포화현상 (gain saturation)이나 spatial hole burning을 무시하였고, 따라서 guided 모드의 이득은 종 방향으로 균일하다고 가정하였으며, 그럼으로 여기서 계산되는 ASE 스펙트럼은 상대적인 (relative) 스펙트럼 분포이다. 또한 우리가 관심 있는 스펙트럼의 파장 범위 내에서는 DFB 구조를 구성하고 있는 매질의 굴절율이나 이득 값이 일정하다고 가정하였다. 모든 자연방출 (spontaneous emission)의 발생은 시간이나 공간 차원에서 서로 상관관계가 없고 (uncorrelated 또는 incoherent), 각 능동 구간에서의 발생율이 균일하며, 자연방출로 인하여 생성된 광자는 순방향 (forward direction)과 역방향 (backward direction)으로 진행되는 guided mode에 결합 될 확률이 같다고 가정하였다. 마지막으로 본 해석에서는 DFB 구조 자체나 guided mode의 횡적인 변화를 배제하고 오직 종 방향의 변화만을 고려하였다. 따라서 본 해석 결과를 실제 DFB 구조에 적용할 경우, 먼저 적절한 방법의 수치해석을 통하여 모드와 이득의 횡 방향 분포를 구한 후 이를 횡 단면에서 적절한 값을 이용하여야 한다. 참고로 본 해석은 [1]과 [2]의 내용을 상당 부분 활용하였다.

2.2 분석

DFB 구조 내의 특정한 위치 $z = z_0$ 에서 발생한 자연방출로 인하여 생성된 두개의 guided mode 성분을 고려해보자 (그림 1 참조). 최초에 역방향 (z_0 의 좌측)과 순방향 (z_0 의 우측)으로 진행을 시작한 전달모드 성분들은 격자 그리고 양 측면의 거울(반사율이 0이 아닌 경우)로 인하여 각각 다중반사 (multiple reflection)를 겪게 되며, 그 중 일부는 이 구조의 좌측과 우측에서 증폭된 형태(ASE)로 출력된다. (가)에서의 가정에 인하여 자연방출이 이득이 존재하는 구간에서 균일하게 발생한다고 했을

때, 좌측과 우측으로 출력되는 ASE의 상대적인 세기 (relative intensity)는 다음과 같은 전체 이득 구간에 대한 적분으로 표현될 수 있다.

$$I_L = \int dz \frac{|t_1|^2 (1 + |r_2|^2)}{|1 - r_1 r_2|^2} \quad (1)$$

$$I_R = \int dz \frac{|t_2|^2 (1 + |r_1|^2)}{|1 - r_1 r_2|^2} \quad (2)$$



그림 1. $z = z_0$ 에서 발생한 자연방출에 관련된 r_1, r_2, t_1, t_2 의 정의

위에서 r_1 과 t_1 은 자연방출의 위치에서 좌측으로 보았을 때의 반사율과 투과율이고

r_2 과 t_2 은 우측으로 보았을 때에 해당하는 값이다. 여기서 DFB 구조의 좌측과 우측은 임피던스 정합 (impedance matching) 되었다고 가정하였다. 즉, 좌측과 우측으로 최종 출력된 빛은 되돌아오지 않는다고 가정하였다. 많은 종류의 DFB 구조는 그림 1과 같이 단순하지 않다. 따라서 결합모드 방정식의 일반 해에 경계조건을 적용하여 r_1, r_2, t_1, t_2 를 구하는 방법은 상당히 번거울 수 있다[1]. 이 때 전달행렬기법 (TMM)을 적용하면 작업이 수월해진다. 전달행렬 T 는 임의의 위치 z_1 과 z_2 에서의 전계 (electric field) 값의 관계를 다음과 같이 표현한다 (그림 2 참조).

$$\begin{bmatrix} E_2^+ \\ E_2^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1^+ \\ E_1^- \end{bmatrix} \quad (3)$$

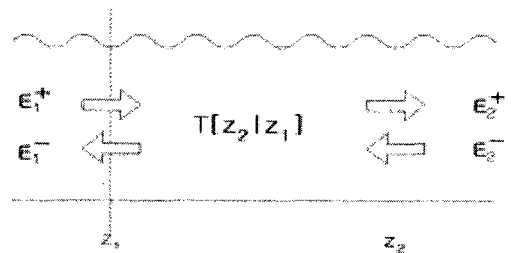


그림 2. z_1 과 z_2 에서의 전계를 연관시키는 전달행렬 T 물론 위에서 T 의 형태는 z_1 과 z_2 사이에 존재하는 구

조에 따라 결정된다.

길이가 L 이고 입력 단의 격자 위상이 Ω 인 균일 격자 (uniform grating)에 해당되는 전달행렬은 다음과 같다. 아래의 표현에서 x 와 α 는 각각 결합계수 및 모드의 이득계수이며 β_0 , δ , 그리고 γ 는 각각 Bragg 전파상수, 주파수 detuning 파라미터, 그리고 복소 전파상수이다 [1].

$$\begin{aligned} t_{11} &= \frac{E - \rho^2 E^{-1}}{1 - \rho^2} e^{-i\beta_0 L} \\ t_{22} &= -\frac{\rho^2 E - E^{-1}}{1 - \rho^2} e^{i\beta_0 L} \\ t_{12} &= -\rho \frac{E - E^{-1}}{1 - \rho^2} e^{-i\Omega} e^{-i\beta_0 L} \\ t_{21} &= \rho \frac{E - E^{-1}}{1 - \rho^2} e^{i\Omega} e^{i\beta_0 L} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $E = e^{\gamma L}$, $\rho = \frac{i\alpha}{\alpha - j\delta + \gamma}$. 위의 표현에서 우리는 행렬의 파라미터 값을 적절히 선택함에 따라 균일 격자 외에도 단순한 평면도파관 (planar waveguide) 또는 위상천이 격자를 나타낼 수도 있다. 예컨대, $x = 0$ 으로 놓음으로써 평면 도파관을, 그리고 $\Omega = \Omega_0 + \Delta\Omega$ (Ω_0 는 전단의 출력위치에서의 격자의 위상; $\Delta\Omega$ 는 위상천이)로 놓음으로써 위상천이 격자를 나타낼 수 있다. 또한 α 의 값을 0으로 놓으면 수동 구간이 된다.

한편, 대부분의 DFB 레이저의 경우 cleaving으로 형성된 거울이던 또는 보다 정밀하게 제작된 다층거울이던 일정한 단면 반사율을 가진 거울을 통하여 빛이 출력되는데, 이러한 거울의 양면에서의 전계를 연관시켜주는 전달행렬은 다음과 같은 구조를 지니고 있다.

$$T = \frac{1}{e^{i\phi} \sqrt{1 - |r|^2}} \begin{bmatrix} 1 & \pm r \\ \pm r & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

위에서 r 은 DFB 구조 내부로부터의 거울 반사율이고, ϕ 는 빛이 거울을 통과하는 과정에서 발생하는 전계의 위상변화이다. 행렬에서 "+" 부호는 DFB 구조의 외부가 거울에 좌측에 위치해 있을 경우에 해당되고 "-" 부호는 구조의 외부가 거울 우측에 있을 때에 적용된다***.

N 개의 구간으로 구성된 DFB 구조 전체에 대한 전달행렬 T 는 수식 2를 연속적으로 적용하면 다음과 같이 각 구간에 해당하는 전달행렬의 곱으로 표현할 수 있다.

$$T = T_N \cdot T_{N-1} \cdot \dots \cdot T_2 \cdot T_1 \quad (6)$$

여기서 T_i 는 왼쪽으로부터 i 번째 구간에 해당되는 전달행렬이다.

위에서 소개한 TMM 기법을 이용하여 DFB 구조 내의 임의의 위치 $z = z_0$ 에서 자연방출이 발생했을 때 그것에 관련된 r_1, r_2, t_1, t_2 를 계산하는 절차는 다음과 같다. 우선 r_2, t_2 를 구하기 위해서는 $z = z_0$ 와 DFB 구조의 맨 우측 출력 단의 외부 사이(우측 거울의 바깥)에 해당되는 전달행렬 T_R 을 구한다. 그러면 r_2 와 t_2 는 T_R 로부터 다음과 같이 얻어질 수 있다.

$$r_2 = -\begin{pmatrix} t_{21} \\ t_{22} \end{pmatrix}_R \quad (7)$$

$$t_2 = \begin{pmatrix} t_{11} - \frac{t_{21}t_{12}}{t_{22}} \end{pmatrix}_R \quad (8)$$

한편 r_1, t_1 를 구하기 위해서는 $z = z_0$ 와 DFB 구조의 맨 좌측 출력 단의 외부 사이(좌측 거울의 바깥)에 해당되는 전달행렬 T_L 을 구한다. r_1 와 t_1 는 T_L 로부터 다음과 같이 얻어질 수 있다.

$$r_1 = \begin{pmatrix} t_{12} \\ t_{22} \end{pmatrix}_L \quad (9)$$

$$t_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ t_{22} \end{pmatrix}_L \quad (10)$$

이와 같은 절차를 이용하여 좌측과 우측으로의 ASE 출력 수식 4-7,8,9,10을 계산할 때 명시할 것은 우리가 자연방출의 발생 위치 z_0 에 대한 적분을 수행할 때 z_0 가 바뀌면 매번 새로운 전달행렬 T_R 과 T_L 을 계산하여 그로부터 r_1, r_2, t_1, t_2 를 구해야한다는 점이다.

3. 시뮬레이션

전산모의실험 절차는 다음과 같이 수행되었다. 우선, 특정한 DFB 구조를 선택하고 그 구조에 관련된 파라미터의 값 x 를 정한다. 다음, 파라미터 벡터의 초기 값 $x^{(0)}$ 을 정한 후 시뮬레이션 프로그램을 실행하여, 추출된 최종 estimate \hat{x}_{final} 과 주어진 값 x 을 비교한다. 시뮬레이터는 모델과 알고리즘의 평가를 위하여 시뮬레이션 과정에 관련된 수치와 더불어 x 및 \hat{x}_{final} 에 대한 ASE 스펙트럼 계산 결과도 그림으로 출력한다.

$$E(x; \hat{x}) \equiv \sqrt{\frac{1}{2\epsilon} \int_{-\epsilon}^{+\epsilon} [I_{meas}(\delta L; x) - I_{ca}(\delta L; \hat{x})]^2 d(\delta L)} \approx \frac{1}{N} \sum [I_{meas}(\delta L_i; x) - I_{ca}(\delta L_i; \hat{x})]^2 \quad (11)$$

여기서 우리는 다음 다섯 가지의 전형적인 DFB 구조에 대한 시뮬레이션 결과를 제시하고 이 결과에 대하여 언급하고자 한다: (i) index-coupled DFB LD (실수 결합계수 x , 단면반사율 $R = 0$); (ii) complex-coupled DFB LD (복소수 결합계수 x , 단면반사율 $R = 0$); (iii) $\lambda/4$ -phase-shifted, index-coupled DFB LD (실수 결합계수 x , 단면반사율 $R = 0$, 중앙에 위치한 격자 위상천이); (iv) index-coupled DFB LD with facet reflection (실수 결합계수 x , 단면반사율 $R_1, R_2 \neq 0$); 그리고, (v) DBR LD (실수 결합계수 x , 단면반사율 $R = 0$, 이득 $\alpha = 0$ 의 값을 가진 수동 격자가 양끝에 배치되어 있고 그 사이에 균일한 활성 (active) 구간 - $\alpha \neq 0$ - 이 있음).

4. 결론

지금까지 DFB-type의 구조에서 위상천이, 결합계수, 단면반사율과 같은 주요 파라미터들이 각각 ASE 스펙트럼에 미치는 영향을 분석하였고 이러한 결과를 바탕으로, 주어진 ASE 스펙트럼의 측정치로부터 DFB 구조의 주요 파라미터 수치를 추출할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 여기서는 실제로 측정된 스펙트럼과 (예측되는 파라미터 수치를 이용하여) 계산된 스펙트럼과의 오차를 최소화하는 파라미터 값의 효율적인 탐색에 중점을 두었다. 마지막으로 위와 같이 개발된 모델 및 알고리즘의 타당성을 전산모의 실험을 통하여 다양한 사례에 대하여 시험하였으며 그 결과는 양호하였다.

좀더 보안을 한다면 ASE 스펙트럼 모델의 보완과 시뮬레이터의 개선 등을 들 수 있다. 보다 정확한 결과를 얻기 위해서는 현재의 모델에 포함되지 않은 축 방향에서의 carrier 및 이득분포의 비균일성 (nonuniformity), 그리고 이에 따른 spatial hole burning 등의 2차적 (secondary) 효과, 또한 매질 이득 (material gain)의 파장의존 등을 고려할 필요가 있다. 아울러 자연방출로부터 guided mode로의 결합계수, 그리고 주입전류와 이득계수와의 구체적인 관계도 포함되어야 할 것이다.

표 1. 전형적인 DFB 유형 구조에 대한 시뮬레이션 결과

	ACTUAL PARAMETER VALUES	INITIAL GUESS	ESTIMATED VALUES
Index-Coupled	$xL=2$ $aL=0.2$	$xL=2.4$ $aL=0.15$	$xL=2.016$ $aL=0.192$
Complex-Coupled (Case I)	$xL=2+0.2j$ $aL=0.02$	$xL=2.32+0.4j$ $aL=0.015$	$xL=1.9952$ $+0.216j$ $aL=0.0152$
Complex-Coupled (Case II)	$xL=2+0.2j$ $aL=0.2$	$xL=2.4+0.35j$ $aL=0.15$	$xL=2.016$ $+0.21j$ $aL=0.195$
$\lambda/4$ -Shifted, Index-Coupled	$xL=2$ $aL=0.2$ $\phi=1.57079$	$xL=2.32$ $aL=0.15$ $\phi=1.0472$	$xL=1.9952$ $aL=0.192$ $\phi=1.54985$
Index-Coupled, with End-Facet Reflection (Case I)	$xL=2$ $aL=0.02$ $R_1=R_2=0.52$	$xL=2.32$ $aL=0.0181$ $R_1=0.7$ $R_2=0.38$	$xL=2$ $aL=0.02$ $R_1=0.546$ $R_2=0.4864$
Index-Coupled, with End-Facet Reflection (Case II)	$xL=2$ $aL=0.01$ $R_1=0.9$ $R_2=0.55$	$xL=2.32$ $aL=0.015$ $R_1=0.7$ $R_2=0.48$	$xL=2.32$ $aL=0.0111$ $R_1=0.903$ $R_2=0.5376$
Index-Coupled, with End-Facet Reflection* ($E_{th}=10^{-8}$)	$xL=2$ $aL=0.02$ $R_1=0.55$ $\phi_1=1.5708$ $R_2=0.55$ $\phi_2=1.5708$	$xL=1.82$ $aL=0.017$ $R_1=0.35$ $\phi_1=1.0472$ $R_2=0.75$ $\phi_2=1.0472$	$xL=2.00029$ $aL=0.019356$ $R_1=0.5497$ $\phi_1=1.5708$ $R_2=0.5515$ $\phi_2=1.5706$
DBR ($L_1 = 300\mu m$ $L_p = 150\mu m$ $L_2 = 200\mu m$)	$xL_1=1.2$ $xL_2=0.8$ $aL_p=0.01$	$xL_1=0.84$ $xL_2=0.56$ $aL_p=0.008$	$xL_1=1.2$ $xL_2=0.8$ $aL_p=0.009943$

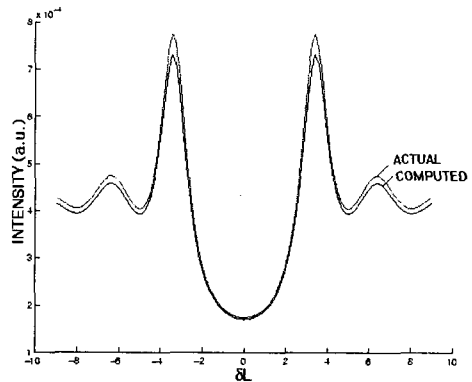


그림 3. 실제 ASE 스펙트럼과 추출된 파라미터로부터 산출된 스펙트럼 (Index-coupled DFB LD)

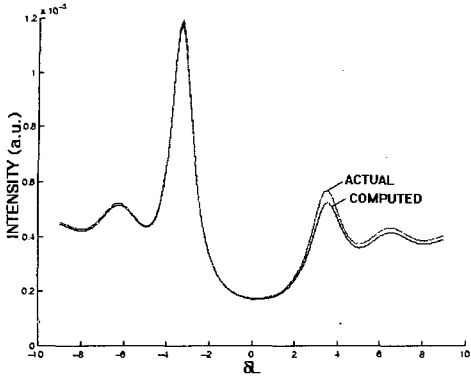


그림 4. 실제 스펙트럼과 산출된 스펙트럼과의 비교 (Complex-coupled DFB LD: II)

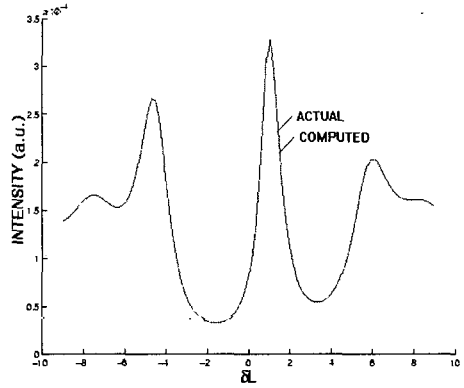


그림 7. 실제 스펙트럼과 산출된 스펙트럼과의 비교 (Index-coupled DBR LD)

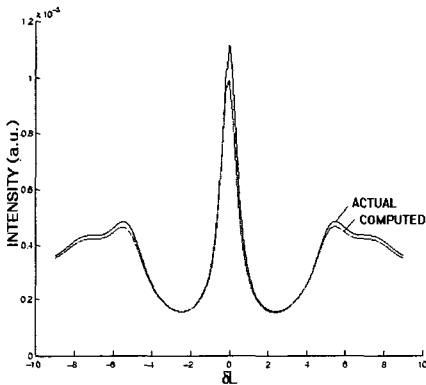


그림 5. 실제 스펙트럼과 산출된 스펙트럼과의 비교 ($\lambda/4$ -shifted, index-coupled DFB LD)

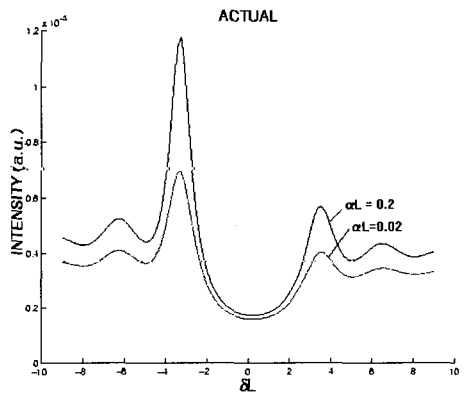


그림 8. 이득이 실제 ASE 스펙트럼에 미치는 영향 (Complex-coupled DFB LD; I, II)

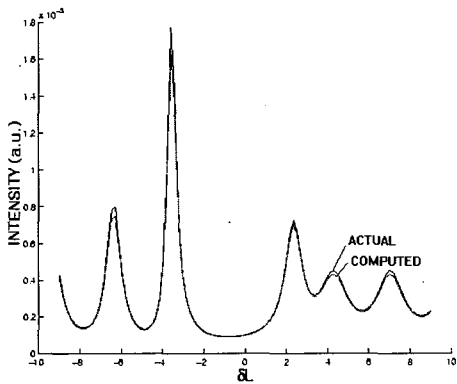


그림 6. 실제 스펙트럼과 산출된 스펙트럼과의 비교 (Index-coupled DFB LD with end-facet reflection, I)

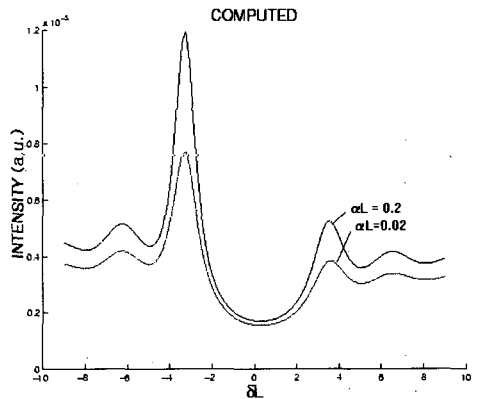


그림 9. 이득이 산출된 ASE 스펙트럼에 미치는 영향 (Complex-coupled DFB LD; I, II)

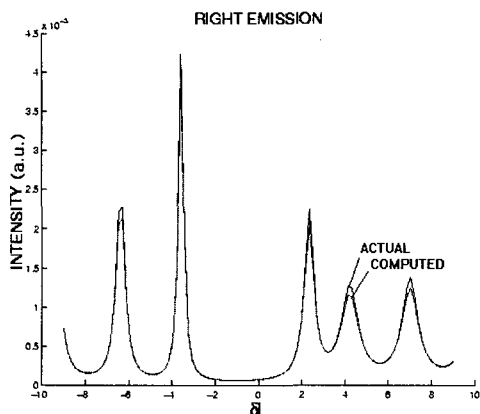


그림 10. 우측으로 출력되는 빛의 ASE 스펙트럼 (Index-coupled DFB LD with end-facet reflection, II)

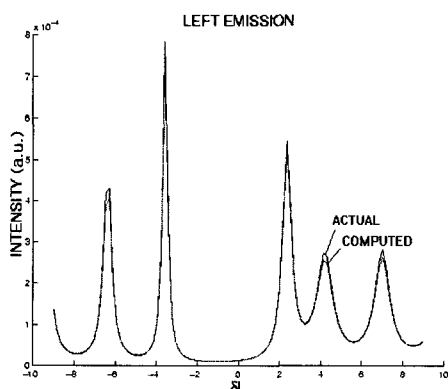


그림 11. 좌측으로 출력되는 빛의 ASE 스펙트럼 (Index-coupled DFB LD with end-facet reflection, II)

참고문헌

- [1]. H. Ghafouri-Shiraz and B. S. K. Lo, *Distributed feedback laser diodes: principles and physical modelling*, Wiley, 1996.
- [2]. H. Soda and H. Imai, "Analysis of the spectrum behavior below the threshold in DFB lasers," *IEEE J. of Quant. Elect.*, vol. QE-22, no. 5, pp. 637-641, May 1986.
- [3]. T. Makino and J. Gliński, "Transfer matrix analysis of the amplified spontaneous emission of DFB semiconductor laser amplifiers," *IEEE J. of Quant. Elect.*, vol. 24, no. 8, pp. 1507-1518, August 1988.

- [4]. J. Weber and S. Wang, "A new method for the calculation of the emission spectrum of DFB and DBR lasers," *IEEE J. of Quant. Elect.*, vol. 27, no. 10, pp. 2256-2266, October 1991.
- [5]. J. Minch, et al., "Theory and experiment on the amplified spontaneous emission from distributed feedback lasers," *IEEE J. of Quant. Elect.*, vol. 33, no. 5, pp. 815-823, May, 1997.
- [6]. Y. Nakano, "Progress of semiconductor gain-coupled DFB laser research," *KIST Seminar I*, 1996.
- [7]. 김민년, 박동욱, "다양한 종류의 DBF구조에 대한 ASE 스펙트럼 계산결과," *COOC '99*, pp. 235-236, May 1999.

김민년(Min-Nyun Kim)

[정회원]



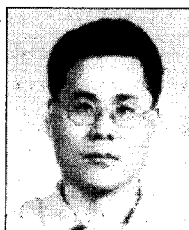
- 1993년 2월 : 홍익대학교 전자공학과 (공학사)
- 1995년 2월 : 홍익대학교 전자공학과 (공학석사)
- 1995년 ~ 1998년 : 대우전자 영상연구소 연구원
- 2003년 8월 : 홍익대학교 전자공학과 (공학박사)
- 2002년 3월 ~ 현재 : 천안대학교 정보통신학부 교수

<관심분야>

전자파 산란, 광파 및 레이저 분석, 원격탐사 계측

채규수(Gyoo-Soo Chae)

[종신회원]



- 1993년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학사)
- 1995년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
- 2000년 12월 : Virginia Tech (공학박사)
- 2001년 1월 ~ 2003년 2월 : Amphenol Mobile(RF manager)
- 2003년 3월 ~ 현재 : 천안대학교 정보통신학부 교수

<관심분야>

안테나 설계, 초고주파 이론...