

<http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2014.14.2.147>

IIBC 2014-2-21

전송선로 이론에 기초한 파장 변환 DFB 레이저의 정적 및 동적 작용

Static and Dynamic Behavior of Tunable DFB Laser based on Modal Transmission-Line Theory

호광춘*

Kwang-Chun Ho*

요 약 2단으로 구성된 DFB 레이저의 정적 및 동적 작용을 분석하기 위하여 종방향 모드 전송선로 이론(L-MTLT)을 이용하였다. 활성영역을 갖는 DFB 구조의 특성 임피던스와 등가 전과상수를 L-MTLT에 기초하여 유도하였다. 2단으로 구성된 DFB 레이저가 전송선로 망으로 유사화 되었으며, 각 단은 그에 대응하는 등가 요소들로 등가화된 전송선로 블록으로 나타내었다. 등가 전송선로 망에 기초한 DFB 레이저의 종방향 공진 조건(resonance condition)이 레이트 방정식(rate equation)을 재구성하기 위하여 사용되었으며, 이를 이용하여 활성영역을 갖는 2단 DFB 레이저의 정적 및 동적 작용을 자세하게 분석하였다.

Abstract A longitudinal modal transmission-line theory(L-MTLT) to analyze the static and dynamic behavior of two-section distributed feedback (DFB) lasers is used. The characteristic impedance and equivalent propagation constant of DFB structure with active layer are derived from L-MTLT. A two-section DFB laser is analogous to a transmission-line network, in which each section is described by transmission-line block corresponding to the equivalent factors. The longitudinal resonant condition of DFB laser based on equivalent transmission-line network is used to reformulate the rate equations so that static and dynamic behavior of two-section DFB lasers with active layer is demonstrated and analyzed accurately.

Key Words : Longitudinal Modal Transmission-Line Theory, Tunable DFB Laser, Static and Dynamic Behavior

I. 서 론

최근, 광통신용 광소자 중에서 다단 반도체 레이저의 정적 및 동적 특성에 대한 연구가 중요한 분야로 대두되어 오고 있다^[1, 2]. 그 중에서도 DFB (distributed feedback) 구조나^[3], DBR (distributed Bragg reflector) 구조로^[4] 구성된 반도체 레이저는 현대역의 단일 모드

광 출력을 발생하기 때문에 연구자들에게 특히 관심을 끌고 있다.

그러나, 오늘날 광통신은 주파수 변조에 의존하는 초고속 광대역 WDM (wavelength division multiplexing) 기술 구현에 많은 비중을 두고 있기 때문에 이를 성취하기 위한 파장 변환 레이저 광원의 분석과 개발이 필수적이다. 이와 같이 요구되는 동작특성을 제공하기 위하여

*종신회원, 한성대학교 정보통신공학과
접수일자 2013년 10월 10일, 수정완료 2014년 2월 5일
게재확정일자 2014년 4월 11일

Received: 10 October, 2013 / Revised: 5 February, 2014 /

Accepted: 11 April, 2014

*Corresponding Author: kwangho@hansung.ac.kr

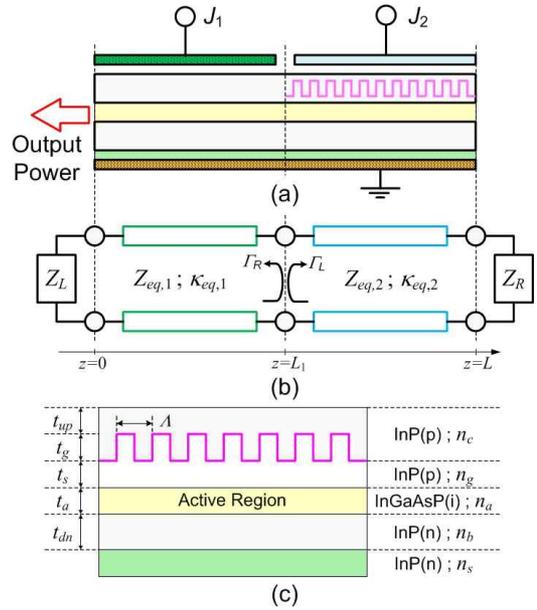
Dept. of ICs Engineering, Hansung University, Korea

다양한 형태의 반도체 레이저 구조들이 제안되어 왔고, 다양한 해석법에 의하여 분석되어 왔다. 그 중에서 활성 영역 (active region)을 갖는 2단 DFB 레이저가 유도방출 (stimulated emission) 하에서 초고속 동작특성을 나타내는 레이저 광원으로 각광 받고 있다. 더욱이, 이 레이저 광원은 2단으로 구성된 각 단에 서로 다른 바이어스 전류를 공급함으로써 매우 향상된 주파수 응답 특성을 얻을 수 있다 [5].

Kuznetsov [6]는 처음으로 2단으로 구성된 DFB 레이저의 정적 (static) 및 동적 (dynamic)을 자세하게 공식화하고 분석하였으며, FM 및 AM 응답특성을 유도하기 위하여 2단으로 구성된 DFB 레이저의 레이트 방정식 (rate equation)을 정의하였다. 또한, Lowery [7]는 시간 영역 전송선로 모델 (time-domain transmission-line model: TD-TLM)을 이용하여 이 구조에 대한 물리적 특성을 분석하였다. 이 TD-TLM은 과도응답 (transient response) 하에서 동작하는 DFB 레이저 구조에 대하여 특히 잘 동작한다. 그러나, 초고속 광대역 광통신에 사용되는 2단 DFB 레이저 광원은 정적 특성뿐만 아니라 잡음을 포함한 동적 특성의 분석이 소자 설계에 있어서 매우 중요한 요소로 작용하므로 TD-TLM을 단순하게 적용하기가 어렵다.

이와 같은 문제를 해결하기 위하여 본 논문에서는 2단으로 구성된 DFB 레이저 광원을 분석하기 위한 종방향 모드 전송선로 이론 (longitudinal modal transmission-line theory: L-MTLT)을 제시하였다. 그림 1(b)에서 보듯이, 격자구조를 갖는 DFB 구조를 포함하여 광원의 각 단들은 등가 임피던스와 등가 전파상수를 갖는 전송선로 블록으로 구성된다. 평판 층으로 구성된 길이 L 의 블록에 대한 등가 값 $Z_{eq,1}$ 과 $\kappa_{eq,1}$ 은 일반적인 전송 선로의 횡방향 공진조건을 통하여 쉽게 결정할 수 있다. 그러나, 주기적인 격자구조를 갖는 DFB 단은 Floquet-Babinet의 원리 [8]에 기초한 L-MTLT를 사용하여 그 등가 값 $Z_{eq,2}$ 과 $\kappa_{eq,2}$ 를 결정할 수 있다. 이에 대한 자세한 설명은 본 논문의 2장에서 언급하였다.

결국, L-MTLT를 사용하여 유사화한 그림 1(b)의 전송선로 블록으로부터 2단으로 구성된 DFB 레이저의 정적 및 동적 특성을 3장에서 자세하게 분석하였고, 본 논문에서 제안한 해석법의 타당성을 보이기 위하여 4장에서 수치해석 결과를 도시하고 설명하였다.



1. 2단으로 구성된 DFB 레이저의 (a) 기하학적 구조, (b) 그 등가 전송선로 망, (c) DFB 구조의 측면도.
Fig. 1. (a) Geometry of two-section DFB laser, (b) the equivalent transmission-line network of DFB laser, and (c) the side view of DFB structure.

표 1. DFB 레이저의 특성분석에 사용된 변수 값.
Table 1. Parameter values used in the analysis of DFB laser.

Spontaneous emission coefficient (A)	1×10^{-5} 1/s
Carrier lifetime (τ)	3×10^{-9} s
Gain parameter (g_N)	3×10^{-16} cm ²
Transparency carrier density (N_0)	1.5×10^{18} cm ⁻³
Linewidth enhancement factor (α_0)	4.86
Emission wavelength (λ_0)	1.55 μ m
Laser length (L)	400 μ m
Refractive index & thickness of cladding layer (n_c , $t_{up}+t_g$)	3.17, 0.29 μ m
Refractive index & thickness of guiding layer (n_g , t_s)	3.4, 0.1 μ m
Refractive index & thickness of active layer (n_a , t_a)	3.45, 0.18 μ m
Refractive index & thickness of cladding layer (n_b , t_{dn})	3.17, 0.2 μ m

II. 등가 전송선로 망의 공진조건

L-MTLT에 기초하여 설계된 2단으로 구성된 DFB 레이저 광원의 기하학적 구조를 그림 1(a)에 도시하였다. 또한, DFB 레이저 광원을 구성하는 각 층의 반도체 물질과 두께를 그림 1(c)에 자세하게 설명하였으며, 그 수치값들을 표 1에 제시하였다.

그림 1(b)에서 보듯이, 그림 1(a)의 2단으로 구성된 DFB 레이저 광원은 각 단을 등가 임피던스와 등가 전파상수를 갖는 전송선로 블록으로 구성할 수 있다. 그때, 평판 층으로 구성된 길이 L_2 의 블록에 대한 등가 값들은 L-MTLT에 기초한 아래의 횡방향 공진 조건(transverse resonance condition)을 이용하여 결정할 수 있다.

$$Z_{up}(\kappa_{eq,1}) + Z_{dn}(\kappa_{eq,1}) = 0 \quad (1)$$

여기서, Z_{up} 과 Z_{dn} 은 각각 횡방향 축 상의 임의의 위치에서 위와 아래로 본 임피던스를 나타낸다.

또한, 주기적인 격자구조를 갖는 DFB 단은 Floquet-Babinet의 원리에 기초한 아래의 고유치 방정식(eigenvalue equation)을 사용하여 그 등가 값을 결정할 수 있다.

$$\cos(\kappa_{eq,2}\Lambda) = \cos(\kappa_1\Lambda_1)\cos(\kappa_2\Lambda_2) - \frac{1}{2}\left(\frac{Z_2}{Z_1} + \frac{Z_1}{Z_2}\right)\sin(\kappa_1\Lambda_1)\sin(\kappa_2\Lambda_2) \quad (2)$$

여기서, $(\kappa_{1,2})$ 와 $Z_{(1,2)}$ 는 각각 격자 주기 $\Lambda_{(1,2)}$ 로 구성된 단위 셀의 전파상수와 그 특성 임피던스를 나타낸다. 결국, 식 (1)과 (2)로부터 그림 1(b)와 같은 2단 DFB 레이저 광원의 등가 전송선로 망을 구성할 수 있으며, 이 망을 이용하여 2단 DFB 레이저 광원의 주파수 선택 특성을 분석할 수 있다.

활성 영역을 갖는 2단 DFB 레이저 광원의 발진 모드(lasing mode)에 대한 주파수 선택 특성을 분석하기 위하여 광전자 분야에서는 발진 조건(lasing condition)또는 왕복 조건(round-trip condition)을 사용한다. 이 조건을 그림 1(b)에 도시된 등가 전송선로 망에 적용하면 아래와 같은 공진 조건이란 특성의 마이크로파 분야의 조건 수식을 얻을 수 있다.

$$1 - \Gamma_R \Gamma_L = 0 \quad (3)$$

여기서, Γ 과 Γ_L 은 $z = L_1$ 에서 오른쪽과 왼쪽으로

들어다 본 전송선로 망의 반사계수를 나타내며, 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\Gamma_{(R,L)} = -\frac{\Gamma_{(2,1)} \left[1 + e^{2i\kappa_{eq,(2,1)}L_{(2,1)}} \right]}{1 + \Gamma_{(2,1)}^2 e^{2i\kappa_{eq,(2,1)}L_{(2,1)}}} \quad (4)$$

여기서, $L_2 = L - L_1$ 이며 $\Gamma_{(2,1)}$ 는 $z = L$ 과 $z = 0$ 에서 각각 부하저항 Z_R 과 Z_L 방향으로 본 반사계수를 의미한다. 결국, 식 (3)으로부터 gain-lever 효과에 의존하는 발진 모드의 유효 굴절률 n_{eff} 를 결정할 수 있으며, 이를 이용하여 DFB 광원의 gain-carrier 관계를 풀 수 있다.

III. L-MTLT에 기초한 정적 및 동적특성

1. 2단 DFB 레이저 광원의 정적 특성

DFB 레이저 광원에서 발생하는 발진 모드들의 이득과 캐리어 밀도(carrier density) 사이의 선형적 관계는 다음과 같다^[9].

$$\gamma = A \frac{\lambda_0^2}{16\pi n_{eff}^2} (N - N_0) \quad (5)$$

여기서, λ_0 는 광 파장, N 는 캐리어 밀도, N_0 는 임계값(transparency)에서의 캐리어 밀도, A 는 자발광 비율(spontaneous-emission rate)을 포함하는 필드 제한율(confinement factor)을 나타낸다.

그러나, 활성영역을 갖는 2단 DFB 레이저 광원과 같이 이득과 캐리어 밀도 사이에 강한 상관성이 있는 소자들의 정적 특성을 분석할 때 아래와 같은 실험에 의존하는 비선형 특성의 이득-밀도 관계식을 사용해야만 한다^[10].

$$\gamma(N) = g_N - (g_N + g_0) \frac{N_s}{N + N_s} \quad (6)$$

여기서, g_N, g_0, N_s 는 각각 실험결과로부터 결정된 물리적 값들이다. 낮은 캐리어 밀도 하에서 (즉, $N=0$ 에서) 식 (1)과 (2)는 서로 일치해야 하며 아래와 같은 등가 관계를 갖는다.

$$g_0 = A \frac{\lambda_0^2}{16\pi n_{eff}^2} N_0 \quad (7)$$

결국, 2장의 공진조건에서 결정된 유효 굴절률 n_{eff} 에 의존하는 아래의 캐리어 밀도와 대역폭 향상계수

(linewidth enhancement factor)의 관계로부터 2단 DFB 레이저 광원의 각 단에서 정의된 캐리어 밀도 N_1 과 N_2 의 특성을 분석할 수 있다.

$$\alpha(N) = -\frac{\Delta n_{eff,r}}{\Delta n_{eff,i}} = \frac{(N + N_s)^2}{(N_0 + N_s)^2} \alpha_0 \quad (8)$$

이에 대한 수치 해석적 결과는 4장에서 자세하게 언급하였다.

2. 2단 DFB 광원의 동적 특성

시간에 따라 변하는 2단 DFB 레이저 광원의 캐리어 밀도와 평균 광자 밀도 (photon density)는 다음과 같은 레이트 방정식에 의존하여 특성이 변한다.

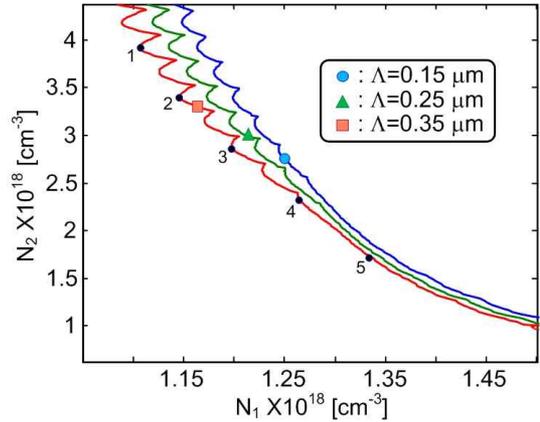
$$\begin{aligned} \frac{dP}{dt} &= GP - \frac{P}{\tau_p} + A, \\ \frac{dN_i}{dt} &= \frac{J_i}{et_a} - \frac{N_i}{\tau} - GP \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, A 는 발진 모드에서 자발광 비율, τ_p 는 광자 수명 (photon lifetime), τ 는 캐리어 수명 (carrier lifetime), J_i 는 2단 DFB 레이저 광원의 각 단에서 공급되는 전류 밀도, t_a 는 활성영역의 두께를 나타낸다. 이때, 실질 유도 방출 비율 (stimulated emission rate)을 나타내는 G 는 주파수에 따라 변하는 이득 계수와 아래와 같은 관계를 갖는다.

$$G = \gamma(N_i, \omega) v_g g_N \quad (10)$$

여기서, v_g 는 발진 모드의 그룹 속도 (group velocity), g 은 캐리어 밀도에 의존하는 최대 이득을 의미하며 실험으로부터 결정되는 값이다.

결국, 동적 특성 (즉, small-signal 분석)은 2단 DFB 레이저 광원에 공급되는 전류 밀도가 $J_i + \Delta J_i e^{i\omega t}$ 와 같이 정현파 형태로 변조된다고 가정하여 분석할 수 있다. 주파수에 따른 전류밀도의 변화는 2장의 공진조건에 의존하여 결정되는 식 (9)와 (10)의 모든 물리적 변수들을 변조시킨다. 그러므로, 변조된 그 값들을 수치해석 함으로써 L-MTLT에 기초한 2단 DFB 레이저 광원의 동적 특성을 분석할 수 있다.



2. N_1 과 N_2 평면에서 격자주기 Λ 에 따른 cut-off 선들의 변화.

Fig. 2. Variation of cut-off lines along grating period Λ in N_1 and N_2 plane.

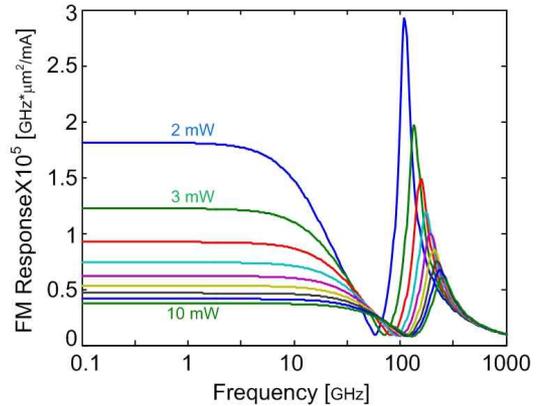


그림 3. DFB 레이저의 다른 출력 값에 따른 FM 응답의 변화.
Fig. 3. Variation of FM response along different output power values of DFB laser.

IV. 수치해석 및 고찰

이 장에서는 그림 1에 보여준 2단 DFB 레이저 광원에 대하여 정의한 3장의 정적 및 동적 특성을 수치 해석적으로 고찰하였다. 수치 해석에 필요한 각 물리적 값들은 표 1에 제시하였으며, 2단 DFB 레이저 광원에서 DFB 단은 전체 길이의 70% ($L - L_1 = 280 \mu\text{m}$)를 차지하도록 설정하였다. 또한, 그림 1(b)에서 부하저항 Z_R , Z_L 에 의하여 표현된 DFB 레이저 광원의 양 끝 말단면 (end-facets)에 대한 반사계수는 0.1과 1로 선택하였다.

먼저, 정상 상태 (steady-state) 동작 조건하에서 정적 특성 (large-signal)을 분석하기 위하여 식 (3)에 주어진 공진조건을 수치 해석적으로 풀었다. 그 결과 평판 영역과 DFB 영역의 캐리어 밀도 N_2 와 발진 주파수 ω 와의 관계를 얻을 수 있었다. 공진 조건을 만족하는 해는 무한하므로, 그림 2에서 보듯이 N_1, N_2 의 평면에 경계선 (cut-off line)들을 사용하여 그 해를 도식하였다. 이 곡선은 공진조건으로부터 발생하는 모든 주파수의 종방향 모드들을 포함하고 있기 때문에 곡선 상의 각 점들은 다른 발진 주파수를 갖는 모드로 해석할 수 있다.

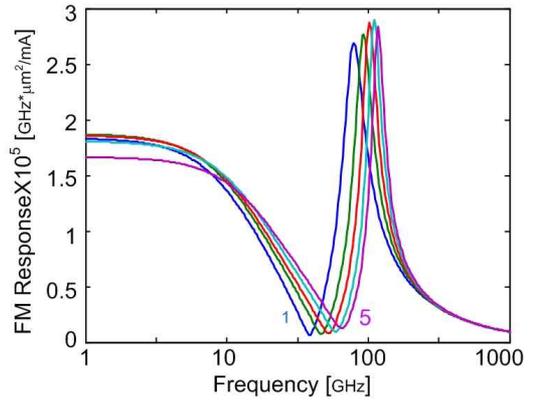
더욱이, 그림에서 보듯이 N_1, N_2 는 DFB 단의 격자주기 Λ 가 감소함에 따라 고정된 N_1 값에 대하여 발진 모드들의 N_2 값과 주파수가 지속적으로 증가함을 알 수 있었다. 또한, 2단 DFB 레이저 광원에 공급되는 전류밀도 J_1, J_2 에 의존하는 정적 특성은 식 (9)에서 주어진 정상 상태 동작 조건을 고려함으로써 분석할 수 있다. 이 특성은 그림 2의 N_1, N_2 그래프를 J_1, J_2 특성을 분석하는 그래프로 쉽게 변환하여 해석할 수 있다. 본 논문에서는 중복 분석을 피하기 위하여 이에 대한 내용은 언급하지 않았다.

다음으로, 2단 DFB 레이저 광원의 동적 특성을 분석하기 위하여 앞서 분석한 정적 특성의 결과로부터 여러 동작 점들을 선택하였다. 이를 위하여 다른 출력 전력에서 같은 캐리어 밀도 결합을 나타내는 N_1, N_2 를 그림 2의 곡선 상에서 선택하여 FM 변조 응답 특성을 분석하였다. 그림 3에서 보듯이, 이 응답 특성은 참고문헌 [6]에서 발표한 내용과 매우 유사한 모습을 나타내었다. 즉, 낮은 주파수 대역에서는 평평한 응답 특성을 나타냈으나, 완화 발진 (relaxation oscillation) 주파수에서 최댓값을 갖기 전에 증감 캐리어 수명 (enhanced carrier-lifetime)의 갑작스런 변화에 의하여 아래로 내려가는 딥 (dip) 현상을 나타내었다.

더욱이, 그림 3은 2단 DFB 레이저 광원의 FM 응답 특성이 출력 전력에 비례하는 광원 내부의 광자 밀도에 임계적으로 의존한다는 것을 잘 보여 주고 있다. 즉, 광자 밀도가 증가함에 따라 출력 전력 값이 증가하게 되어 레이트 방정식의 유도 방출의 의존성이 더욱 커진다. 식 (9)에 정의된 이 증가하는 유도 방출 요소는 캐리어 수명을 억압하고 결국 FM 응답 특성에 딥을 발생시킨다. 그림 3에서 보듯이, 완화 발진 최댓값이 높은 주파수 대역으로

조금씩 이동하는 것을 볼 수 있다. 출력 전력 값이 약 8 mW 변함에 따라 완화 발진 최댓값이 약 10 GHz 이동하였다.

마지막으로, 동적 특성에 대한 gain-lever 효과를 확인하기 위하여 $\Lambda = 0.35 \mu\text{m}$ 곡선 상의 다른 5개의 점에서 FM 응답 특성을 분석하였다. 그림 4에서 보듯이 점 5에서부터 1로 이동함에 따라 DFB 단의 캐리어 농도는 증가하는 반면 평판 단의 캐리어 농도는 감소한다. 그로 인하여 소자는 gain-lever 효과에 근접해 지며 향상된 변조 특성을 나타낸다. 이에 대한 수치 해석적 결과가 그림 4에 잘 나타나 있다.



4. 그림 2의 등가 전력선 상에서 있는 다른 바이어스 값에 따른 FM 응답의 변화.

Fig. 4. Variation of FM response along different biased points on equi-power line of Fig. 2.

V. 결론

활성영역을 갖는 2단 DFB 레이저 광원의 정적 및 동적 특성을 분석하기 위하여 종방향 모드 전송선로 이론 (L-MTLT)의 공진조건을 사용하였다. DFB 구조에서 특성 임피던스와 전파상수를 구하기 위하여 Floquet-Babinet의 원리를 적용하였으며, 그림 1(b)에 묘사한 것처럼 2단 DFB 레이저 광원을 2단의 등가 전송선로 망으로 유사화하였다. 또한, 코팅되어 있는 소자의 양 말단면 (end-facets)은 반사율에 비례하는 부하저항으로 등가화하였다.

정적 특성 (large-signal)은 전송선로 망의 종방향 공

진조건을 수치 해석하여 분석하였으며, 발진 주파수, 캐리어 밀도, 필드분포와 같은 소자의 물리적 변수들을 해석적으로 정확하게 평가할 수 있었다. 또한, L-MTLT에 기초한 이들 물리적 변수들은 DFB 레이저 광원의 동적 특성 (small-signal)을 분석할 때 매우 중요한 수치 해석적 결과를 제공하였다. 결국, 본 논문에서 제안한 L-MTLT에 기초한 2단 DFB 레이저 광원의 특성 분석은 소자 해석 시에 복잡한 Wronskian 행렬을 취급할 필요 없이, 수치 해석적 복잡도 (complexity)를 최소화할 수 있음을 잘 보여 주었다.

References

- [1] A. J. Lowery, "Modeling the static and dynamic behavior of quarter-waveshifted DFB lasers," IEEE J. Quantum Electron., vol. 28, pp. 1874 - 1882, 1991.
- [2] J. Hamasaki and T. Iwashima, "A single-wavelength DFB structure with a synchronized gain profile," IEEE J. Quantum Electron., vol. 24, pp. 1864 - 1872, 1988.
- [3] G. Bojork and O. Nilsson, "A tool to calculate the linewidth of complicated semiconductor lasers," IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-23, pp. 1303 - 1313, 1987.
- [4] X. Pan, H. Olesen and B. Tromborg, "A theoretical model of multielectrode DBR lasers," IEEE J. Quantum Electron., vol. 24, pp. 2423-2432, 1988.
- [5] G. Griffel, R. J. Lang and A. Yariv, "Two-section gain-levered tunable distributed feedback laser with active tuning section," IEEE J. Quantum Electron., vol. 30, pp. 15-18, 1994.
- [6] M. Kuznetsov, "High-speed frequency modulation and switching of tunable distributed feedback lasers with two active segments," J. Quantum Electron., vol. 27, pp. 668-677, 1991.
- [7] A. J. Lowery, "Transmission-line modeling of semiconductor lasers: The transmission-line laser model," Int. J. Numer. Model, vol. 2, pp. 249 - 265, 1989.
- [8] K. C. Ho, and K. Ho, "Longitudinal Modal Transmission-Line Theory (L-MTLT) of Multilayered Periodic Waveguides," IEICE Trans. Electronics, vol. E88-C, No. 2, pp. 270~274, 2005.
- [9] K. J. Vahala, M. A. Newkirk, and T. C. Chen, "The optical gain lever: A novel gain mechanism in the direct modulation of quantum well semiconductor lasers," Appl. Phys. Lett., vol. 54, pp. 2506-2508, 1989.
- [10] J. O. Park and W. K. Jang, "Optical metrology for resonant surface acoustic wave in RF device," J. of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 11, pp. 3435-3440, 2010.

소개

광 춘(중신회원)

- 제 10권 1호 참조
- 현 한성대학교 정보통신공학과 교수
- 주관심분야 : Optical Communications, Optical Electromagnetics, Design and Analysis of Photonic Devices, Design and Analysis of RF (microwave) Devices, Optical Biosensors and Bioelectronics

※ 본 연구는 한성대학교 교내연구비 지원과제입니다.