

능동-수동 경계에서의 반사가 다전극 DBR 레이저의 튜닝특성에 미치는 영향

홍성룡 · 김덕봉 · 최안식 · 윤태훈 · 김재창 · 김선호*

부산대학교 전자공학과

*한국과학기술연구원 정보전자연구부

(1996년 1월 31일 받음)

본 논문에서는 특성행렬을 사용하여 다전극 DBR 레이저의 능동 영역과 수동 영역의 경계가 튜닝특성에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 능동-수동 경계면에서 굴절율의 변화가 급격한 경우에 경계면에서의 반사가 레이저의 위상특성과 임계이득 특성에 왜곡을 일으켜 연속 튜닝범위가 좁아지게 된다. 반면, 완만한 굴절율 변화를 가진 경우에는 능동-수동 경계의 반사에 의한 영향이 줄어 연속튜닝범위가 넓고, 튜닝특성이 일반적인 DBR 레이저의 해석방법(능동-수동 경계를 무시하는 경우)에 의한 튜닝특성과 비슷함을 확인하였다.

I. 서 론

광정보 통신에 있어 전송속도가 빨라지고 전송용량이 늘어남에 따라 기존의 Time Division Multiplexing (TDM)과 같은 전송방식으로는 그 응용 범위가 제약을 받는다. 따라서 전송속도가 10 Gb/s 이상이고 대용량 전송을 위한 광통신 시스템에서는 Wavelength Division Multiplexing(WDM) 혹은 Frequency Division Multiplexing(FDM) 방식이 많이 이용된다.^{1,2)} 이러한 WDM/FDM 방식을 이용한 광통신 시스템에서 파장가변형 레이저나 필터 등은 반드시 필요한 소자이다. 본 논문에서 연구한 다전극 Distributed Bragg Reflector(DBR)-Laser Diode(LD)는 파장 가변형 레이저 중에서 비교적 연속 파장가변 범위가 넓고, 파장을 온도, 전류, 전압 등에 의해서 간단하게 제어할 수 있고, 발전모드가 안정하여 광통신의 광원으로 많이 이용될 수 있다.

다전극 DBR 레이저는 광자를 발생시키는 능동영역과 발전파장을 튜닝시키는 수동 영역으로 구성되는데, 수동영역은 다시 Phase Control(PC) 영역과 DBR 영역으로 구분된다. 일반적으로 다전극 DBR 레이저의 튜닝특성을 해석할 때에는 능동-수동 영역의 유효굴절율 차이에 의한 경계면에서의 반사를 무시하여 간단히 해석한다. 그러나 실제 DBR 레이저구조에서는 능동영역의 두께에 의한 유효굴절율 차이와 튜닝시 PC 영역에 인가되는 전류에

의한 굴절율 감소에 의한 유효굴절율 차이가 발생하게 된다.

본 논문에서는 능동 영역과 수동 영역 사이의 유효굴절율 분포가 급격한 변화를 가진 구조에 대한 튜닝특성을 해석한다. 그리고 능동영역과 수동영역의 경계에서 유효굴절율이 완만하게 변하는 구조에 대해서 튜닝특성을 해석하여 일반적인 해석방법에 의한 튜닝특성과 비교하여 본다. 일반적으로 능동영역과 수동영역의 경계에서 완만한 굴절율 변화는 레이저의 제작공정에서 능동영역의 PC 영역 쪽 모서리 부분이 완만하게 변함으로써 발생된다. 이를 위해 다층박막 구조의 해석에 용이한 특성행렬을 이용하여 능동-수동 경계조건에 따른 연속 튜닝특성을 해석했다.

II. 다전극 DBR 레이저의 발전파장 튜닝

다전극 DBR 레이저의 구조는 그림 1에서 보이고 있는데, 능동 Fabry-Perot(FP) 영역, 수동 PC 영역, 수동 DBR 영역으로 구성되어 있다. 세 영역의 전극은 서로 분리되어 전기적으로 독립되어 있다. 수동 영역에 전류를 인가하면 발전파장을 튜닝시킬 수가 있는데, 먼저 PC 영역에 전류를 인가하면 굴절율이 감소하여 공진기의 광행로 길이가 변하므로 공진모드가 변화하여 레이저의 발전파장이 튜닝 된다. 그리고 DBR 영역은 파장의존적인

표 1. 3영역 DBR 레이저의 파라메타
능동 영역

파라메타	기호	크기	단위
굴절율	n_a	3.4547	
그룹 굴절율	n_g	3.56	
내부손실	α_a	2250	m^{-1}
선형 재결합 계수	τ	10^{-8}	sec
Bimolecular 재결합 계수	B	$8 \cdot 10^{-17}$	m^2/sec
Auger 재결합 계수	C	$7.5 \cdot 10^{-41}$	m^6/sec
광이득 계수	a	$2.5 \cdot 10^{20}$	m^2
캐리어에 대한 굴절율의 비	dn/dN	$-18 \cdot 10^{-27}$	
왼쪽 벽개면의 반사율	r_L	0.56	
Linewidth enhancement factor	a	6.6	
자연발광 계수	n_{sp}	2.2	
광가둠 계수	Γ	0.2032	
active 영역의 두께	d	0.18	μm
active 영역의 폭	w	1.2	μm

수동 영역

굴절율	n_i	3.4	
내부손실	α_i	1500	m^{-1}
Auger 재결합 계수	C	$4 \cdot 10^{-41}$	m^6/sec
광이득 계수	a	$2.5 \cdot 10^{20}$	m^2
캐리어에 대한 굴절율의 비	dn/dN	$-18 \cdot 10^{-27}$	m^3
캐리어에 대한 흡수율의 비	$d\alpha/dN$	$2.3 \cdot 10^{21}$	m^2
Bragg 파장	λ_{Bm}	1.55	
광가둠 계수	Γ	0.3305	
도파로의 두께	d	0.23	μm
도파로의 폭	w	1.2	μm
정규화된 결합계수	kL_b	2.0	

반사율 특성을 지니는데, 이 영역에 전류를 인가하면 굴절율이 감소하여 높은 반사율을 가지는 Bragg 밴드가 단파장으로 이동하게 된다. 따라서 임계이득조건이 가장 낮은 모드에서 발진되는 발진조건에 의해 레이저의 발진파장은 튜닝 된다.

본 논문에서 다루는 다전극 DBR 레이저의 발진조건을 구하기 위해서 그림 2와 같이 FP 레이저 형태로 모델링하였다.^[4]

그림 2에서 전송선 이론을 이용하여 다전극 DBR 레이저의 특성방정식은

$$(n_a - n_p)[r_L e^{-j2k_d a} - r_{DBR} e^{-j2k_p b}] = (n_a + n_p)[1 - r_L r_{DBR} e^{-j2k_p b} e^{-j2k_d a}] \quad (1)$$

로 구할 수 있다. 여기서 r_{DBR} 은 DBR 영역의 유효반사율이고 r_L 은 $z = -L_a$ 에서의 절단면의 반사율이다. 그리고 각 영역의 복소 전파상수는

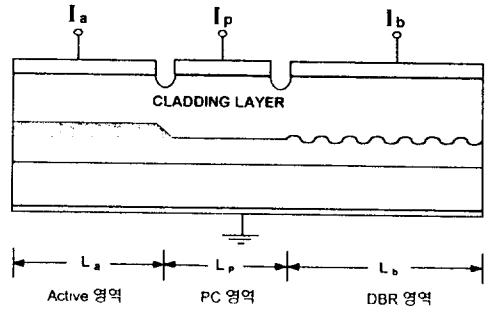


그림 1. 다전극 DBR 레이저의 구조.

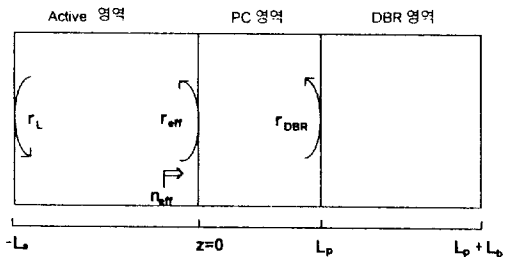


그림 2. 다전극 DBR 레이저의 Fabry-Perot 모델링.

$$k_a(\omega, N_a) = \frac{\omega}{c} n_a(\omega, N_a) + j\alpha_a \quad (2)$$

$$k_i(\omega, N_i) = \frac{\omega}{c} n_i(\omega, N_i) - j\alpha_i(\omega, N_i) \quad (i=p, b) \quad (3)$$

로 표현된다.^[4] 여기서 c 는 빛의 속도이고 n_a, n_p, n_b 는 각 영역의 유효굴절율이다. N_a, N_p, N_b 는 능동, PC, DBR 영역의 전하농도이다. 그리고 α_a 는 능동 영역에서의 임계이득을 나타내고 α 는 수동 영역에서의 단위 길이 당 도파로 손실이다.

식 (1)의 특성방정식의 해가 발진조건을 결정하게 되는데, 능동-수동 경계에서의 유효반사율 r_{eff} 를 이용하면 식 (1)의 다전극 DBR 레이저의 특성방정식은

$$1 - r_L r_{eff}(\omega, N_p, N_b) \cdot e^{-2k_p L_p} = 0 \quad (4)$$

로 간단히 표현된다. 이때 유효반사율 r_{eff} 는 특성행렬을 이용하여 간단하게 구할 수 있다. 특성행렬은 임의의 두 경계면의 전자장의 관계를 나타내는 것으로 임의의 경계 p-1과 p에서의 전자장을 경계조건에 맞추어 연관짓는다

$$\begin{bmatrix} E_{p-1} \\ H_{p-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta_p & j \frac{\sin\delta_p}{Y_p} \\ j Y_p \sin\delta_p & \cos\delta_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_p \\ H_p \end{bmatrix}$$

의 특성행렬로 표현된다.^[5] 여기서, E_p, E_{p-1} 과 H_p, H_{p-1} 은 경계 p 와 $p-1$ 에서 입사빔과 반사빔의 전장과 자장의 경계면에 대한 접선성분이다. Y_p 는 매질의 어드미턴스로 매질의 복소굴절율($N_p = n + i\alpha/4$)과 $Y_p = \eta_p N_p$ 의 관계를 가진다. n, α 는 굴절율과 흡수율 계수, λ 는 자유공간에서의 빛의 파장이고 η_p 는 자유공간에서의 특성어드미턴스(characteristic admittance)이다. 그리고 δ_p 는 층 p 에 입사하여 두께 d_p 를 진행하면서 생기는 위상변화로써 $2\pi N_p d_p / \lambda$ 이다. 그러므로 복잡한 구조의 DBR 영역을 다층박막으로 모델링하면, 각 층에 대한 특성행렬의 곱으로 DBR 영역의 전후방의 전자장의 관계를 구할 수 있다. 따라서 이를 이용하면 간단히 DBR 영역의 반사율 특성을 구할 수 있다.^[6]

다전극 DBR 레이저의 발진파장 튜닝은 수동 영역에 인가된 전류에 의해 전하농도가 증가 하게되고, 이에 따라 굴절율이 감소하여 공진모드의 파장과 Bragg 파장이 변함으로써 일어난다. 이 때 수동 영역의 전하농도는 능동 영역에서와는 달리 임계전류 이상에서도 포화되지 않으므로, 다전극 DBR 레이저는 넓은 튜닝범위에서 동작할 수 있다.^[4]

일반적으로 전류주입에 의해 전하농도가 증가하면 굴절율은 감소하고, 매질 내에서의 전하의 흡수는 증가하게 된다. 전하농도에 따른 각 영역의 굴절율은^[7]

$$n_i = n_{i0} + \Gamma \frac{dn}{dN} N_i \quad (i = p, b) \quad (6)$$

로 표현된다. 여기서 n_{i0} 는 전하 주입이 없을 때의 수동 영역의 평균굴절율이다. 그리고 N_i 는 전하 주입에 따른 수동 영역에서의 전하농도이다. dn/dN 은 전하농도에 대한 굴절율의 변화 비이다. InGaAsP 레이저의 경우 dn/dN 의 값은 약 $-6 \times 10^{-27} \text{ m}^3$ 이고,^[7] Γ 는 전체 출력에 대한 도파로내에 한정되는 출력의 비이다. 전하농도에 대한 흡수율의 변화는

$$\alpha_i = \alpha_{i0} + \Gamma \frac{d\alpha}{dN} N_i \quad (i = p, b) \quad (7)$$

와 같다. 여기서, α_{i0} 는 전하 주입이 없을 때 수동 영역의 도파로내에서의 흡수율이다. $d\alpha/dN$ 은 전하농도에 대한 흡수율의 변화 비이다. InGaAsP 레이저의 경우, $d\alpha/dN$ 의 값은 약 $2.3 \times 10^{-21} \text{ m}^2$ 정도이다.^[7] 이런 굴절율과 흡수율의 변화에 의해 DBR 거울의 Bragg 파장이 이동하게 되는데, Bragg 각주파수 ω_B 는 전하농도 N_b 와 선형함수의 관계를 가진다.^[8]

$$\omega_B = \omega_{B0} - \Gamma \frac{\omega_{B0}}{n_{b0}} \frac{dn}{dN} N_b \quad (8)$$

여기서 ω_{B0} 는 주입 전류가 없을 때 Bragg 각 주파수이고, n_{b0} 는 주입 전류가 없을 때 DBR 영역의 평균 굴절율이다.

III. 능동-수동 경계면의 영향

일반적으로 다전극 DBR 레이저의 튜닝특성을 해석할 때에는 능동-수동 영역의 유효굴절율 차이에 의한 경계면에서의 반사를 무시하여 간단히 해석한다. 그러나 실제 다전극 DBR 레이저 구조에서는 능동영역의 두께에 의한 유효굴절율 차이와 튜닝시 PC 영역에 인가되는 전류에 의한 굴절율 감소에 의한 유효굴절율 차이가 발생하게 된다. 그러므로 능동영역과 수동영역의 유효굴절율 차이에 의한 반사가 튜닝특성에 어떤 영향을 미치는지 살펴보아야 한다. 그림 3(a)처럼 능동-수동 경계에서 굴절율 분포가 급격하게 변하는 경우, 능동영역과 수동영역 경계에서의 반사는 PC 영역과 DBR 영역의 경계에서의 반사와 함께 PC 영역이 기생공진기로 동작하게 한다. 이로 인해 그림 4와 같이 능동영역에서 수동영역 쪽으로

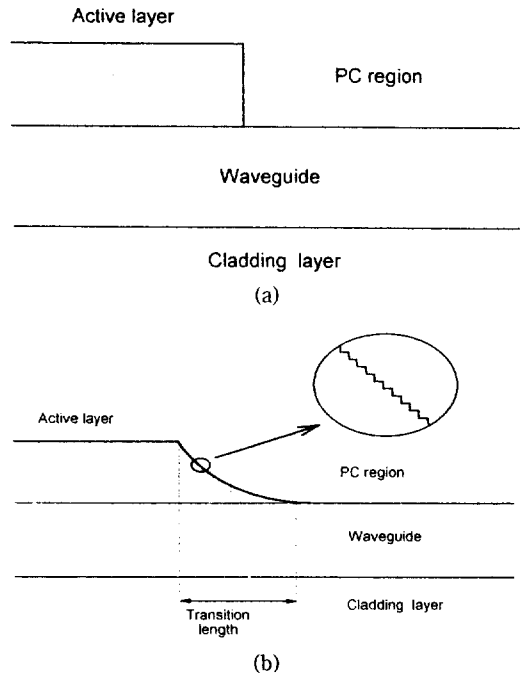


그림 3. 능동-수동 경계에서의 굴절율 분포. (a) 능동-수동 경계의 급격한 굴절율 분포, (b) 능동-수동 경계의 완만한 굴절율 분포.

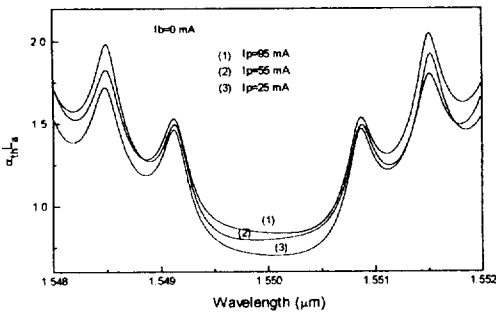


그림 4. 능동-수동 경계가 급격한 굴절을 변화인 경우의 파장 및 I_p 에 따른 임계이득 곡선.

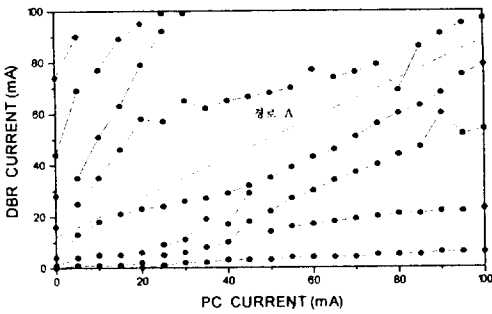


그림 5. 능동-수동 경계가 급격한 굴절을 변화를 가진 경우의 연속 튜닝 영역.

본 유효반사율 r_{eff} 의 특성이 왜곡되어 Bragg 파장에 대해서 비대칭적인 형태를 보여준다. 임계이득의 왜곡은 능동-수동영역의 유효굴절을 차이가 클수록 심화된다. 따라서 임계이득조건이 각 공진모드에 따라 변하게 되어, 오히려 Bragg 파장에 가장 가까운 공진모드가 발진하지 못하는 현상이 발생한다. 이런 왜곡현상은 수동 영역에 전류를 인가했을 때 심화되어 튜닝특성에 불규칙성을 야기시키게 된다.^[9] 그림 5는 넓은 연속튜닝범위를 얻기 위해서 PC 전류와 DBR 전류를 동시에 제어했을 때 모드점핑이 일어나는 경계선을 나타냈다. 그림 5에서 모드점핑의 경계선이 매우 울퉁불퉁함을 보여주고 있는데, 이것은 임계이득의 왜곡에 의해서 PC 전류를 바꿔가면서 DBR 전류를 변화시켰을 때 모드점핑이 일어나는 간격이 매우 불규칙적으로 일어나기 때문이다. 따라서 모드점핑 경계선 사이로 직선을 그어 연속튜닝을 위한 PC 전류와 DBR 전류의 비례관계식을 얻기가 힘들어진다. 그림 5에서 모드점핑 경계선 사이로 그은 경로 A는 PC 전류가 80 mA가 되면 모드점핑 경계선과 교차하므로, 연속 튜닝을 얻기 위한 PC 전류의 인가범위는 0 mA에서 80 mA 정도이고 DBR 전류의 인가범위는 13 mA에서 80 mA

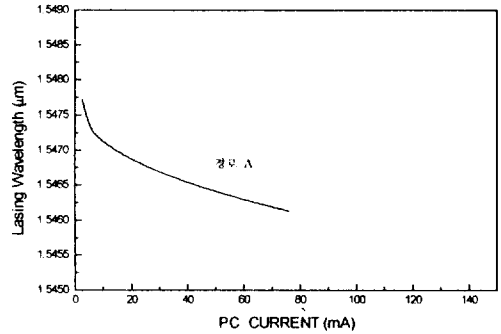


그림 6. 능동-수동 경계가 급격한 굴절을 변화를 가진 경우의 동시 전류 제어에 따른 다전극 DBR 레이저의 튜닝특성.

정도이라는 것을 알 수 있다. 그림 5에서 구해진 경로 A를 따라 전류를 인가했을 때의 튜닝특성을 그림 6에 나타내었다. 그림 6에서 발진파장의 천이는 8 mA 근처에서 변곡이 생기며 발진파장의 연속 튜닝범위는 대략 1.5 nm 정도이다. 능동-수동 경계가 급격한 굴절을 변화를 가지는 경우, 연속 튜닝범위가 매우 제한되는 것을 알 수 있다.

레이저의 제작공정에서 능동영역의 식각과 cladding 층의 재성장예 의해 능동영역의 PC 영역 쪽의 모서리 부분이 그림 3(b)처럼 완만하게 깎이게 된다. 그러므로 능동-수동영역의 경계에서 능동영역의 두께 차이에 의해 유효굴절율이 완만하게 변하는 부분이 발생하게 된다. 보통 능동영역의 두께가 완만하게 변하는 부분의 길이는 능동영역의 두께와 비슷하거나 조금 큰 값을 가진다. 이 경우 능동-수동 경계에서 생기는 반사가 감소하여 능동-수동 경계가 급격한 굴절을 변화를 가진 경우보다 임계이득과 위상특성의 왜곡현상이 줄어들게 된다. 이 경우 다전극 DBR 레이저의 튜닝특성을 구하기 위해 능동영역과 수동 영역의 경계에서 굴절율이 완만하게 변하는 부분을 포함한 DBR 영역의 유효반사율 r_{eff} 를 특성행렬을 이용해서 구하고, 이를 이용하여 다전극 DBR 레이저의 발진모드를 구하였다. 그리고 능동-수동 경계에서 유효굴절율이 완만하게 변하는 부분의 길이를 바꿔가며 임계이득과 위상특성의 왜곡현상이 없어지는 길이를 찾았다. 여러 번의 시뮬레이션을 통해 다전극 DBR 레이저의 능동 영역의 두께가 0.18 μm이고 수동영역 도파로의 두께는 0.23 μm일 때 두께가 완만하게 변하는 부분의 길이가 0.12 μm 이상이 되면 능동-수동영역의 경계가 튜닝특성에 미치는 영향이 최소가 되는 것을 발견했다.

능동-수동 경계의 굴절을 변화가 완만한 경우, PC 전

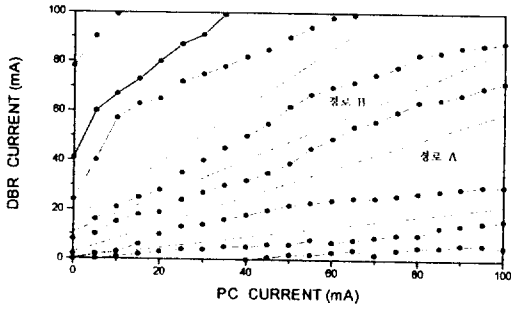


그림 7. 능동-수동 경계가 완만한 굴절율 변화를 가진 경우의 연속 튜닝 영역.

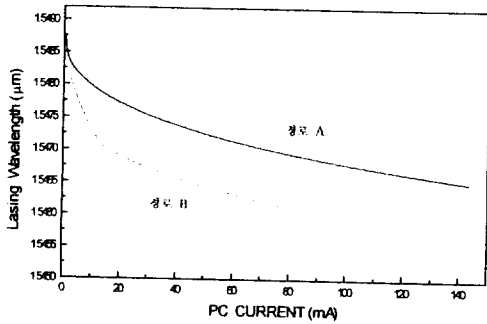


그림 8. 능동-수동 경계가 완만한 굴절율 변화를 가진 경우의 동시 전류 제어에 따른 다전극 DBR 레이저의 튜닝특성.

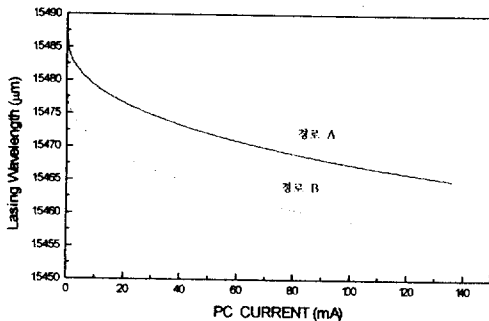


그림 9. 능동-수동 경계를 무시한 경우의 동시 전류 제어에 따른 다전극 DBR 레이저의 튜닝특성.

류와 DBR 전류를 동시에 인가했을 때 모드점핑이 일어나는 경계선을 그림 7에 나타냈다. 그림 7에서 모드점핑이 일어나는 경계선이 비교적 깨끗한 모양을 가짐을 알 수 있는데, 이것은 PC 전류를 바꿔가면서 DBR 전류를 변화시킬 때 모드점핑이 일어나는 간격이 비교적 규칙적이기 때문이다. 따라서 임계이득과 위상특성의 왜곡이 감소했음을 알 수 있다. 그림 7에서 구해진 경로

A의 PC 전류와 DBR 전류와의 관계식에 대한 다전극 DBR 레이저의 튜닝특성을 그림 8에 나타냈다. 발진과 장의 연속 튜닝범위는 대략 2.2 nm로 매우 넓어 졌음을 알 수 있다. 경로 B에 대한 튜닝은 15 mA 근처에서 변곡을 보이고 있고 연속 튜닝범위는 2.2 nm 정도이다. 이와 같이 완만한 유효굴절율 변화를 가진 경우의 다전극 DBR 레이저의 연속튜닝특성은 그림 9에 있는 능동-수동 경계를 무시한 경우의 연속튜닝특성과 비슷한 정도임을 알 수 있다.

그러므로 능동-수동영역의 경계에서 완만한 굴절율 변화를 가진 구조는 경계면에서 반사를 작게 하여, 임계이득과 위상특성의 왜곡현상이 다전극 DBR 레이저의 연속튜닝특성에 미치는 영향을 줄일 수 있다. 따라서 레이저의 제작시 능동-수동영역의 경계에서 완만하게 유효굴절율이 변하는 부분이 필요하다는 것을 알 수 있다. 그리고 능동-수동영역의 유효굴절율 차이를 무시한 간단한 해석을 통해 다전극 DBR 레이저의 튜닝특성을 해석할 수 있다는 것을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 다전극 DBR 레이저의 능동 영역과 수동 영역의 경계가 레이저의 튜닝특성에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 능동-수동 경계면에서 반사에 의한 효과가 튜닝특성에 어떤 영향을 미치는 지 알기 위해 능동-수동 경계면에서 굴절율의 변화가 급격한 경우와 완만한 경우에 대해 튜닝특성을 해석했다. 급격한 굴절율의 변화를 가진 경우는 연속 튜닝범위가 제한된다. 그러나 능동-수동 경계면에서 완만한 굴절율 변화를 가진 구조에서는 능동-수동영역의 경계면에서 반사를 감소시켜 임계이득과 위상특성의 왜곡현상을 감소시키므로 비교적 넓은 연속 튜닝범위를 구할 수 있었다. 이때 완만하게 굴절율이 변하는 부분의 길이가 능동영역의 두께의 반 이상이면 양호한 연속튜닝특성을 보였다. 그리고 다전극 DBR 레이저의 튜닝특성은 해석의 편의를 위해서 능동-수동 경계에서 반사를 무시하고 간단하게 해석할 수 있음을 알았다.

참 고 문 헌

- [1] J. J. Pan and F. Liang, Laser Focus World, vol. 30, pp. 111-115, 1994.
- [2] H. Kobriniski and K. W. Cheung, IEEE Commun. Mag., pp. 53-63, Oct. 1989.

- [3] Y. Tohmori, Y. Yoshikuni, T. Tamamura, H. Ishii, Y. Kondo, and M. Yamamoto, *IEEE Photon. Tech. Lett.*, vol. 5, pp. 126-129, 1993.
- [4] X. Pan, H. Olesen, and B. Tromborg, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 24, no. 12, pp. 2423-2431, 1988.
- [5] H. A. Macleod, *Thin-Film Optical Filter*, 2nd ed., Macmillan, 1986.
- [6] 김덕봉, 윤태훈, 김재창, *한국광학회지*, 제4권, 제3호, pp. 317-322, 1993.
- [7] A. Tsigopoulos and T. Sphicopoulos, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-28, no. 2, pp. 415-426, 1992.
- [8] T. P. Lee and C. E. Zah, *IEEE Commun. Mag.*, pp. 42-52, Oct. 1989.
- [9] 홍성룡, 김덕봉, 윤태훈, 김재창, 김선호, 제4회 광자기술 학술회의 논문집, pp. 15-16, 1995.

Effect of the Reflectance at the Active-Passive Interface on the Tuning Characteristics of a Multielectrode DBR Laser

Sung-Ryong Hong, Dug-Bong Kim, An-Shik Choi,
Tae-Hoon Yoon, Jae Chang Kim and Sun Ho Kim*

Dept. of Electronics Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

**Division of Electronics and Information Technology, Korea Institute of Science and Technology, PO BOX 131, Cheongryang, Seoul 130-650, Korea*

(Received: January 31, 1996)

In this paper, we studied effects of active-passive interface on the tuning characteristics of a multielectrode DBR laser. An abrupt interface distorts the threshold gain and the phase change in a multielectrode DBR laser, which results in narrowing of the continuous tuning range. On other hand, an interface with the gradual index change gives tuning characteristics which is very similar to that obtained by ignoring the interface.