

論文95-32A-2-14

# 고효율, 적색편이, 광변조대역폭의 FM 응답특성을 갖는 1.55 $\mu$ m InGaAsP/InP MGL-MQW-DFB-LD

## (1.55 $\mu$ m InGaAsP/InP MGL(Multi-Gain-Levered)-MQW-DFB-LD with high, red-shifted, and large bandwidth FM response)

沈鍾寅 \*

(Jong In Shim)

### 요약

단일주파수 반도체 레이저의 FM특성을 개선하기 위해 다중이득레버라는 새로운 효과를 방법을 제안하고, 이기술을 1.55 $\mu$ m InGaAsP/InP MGL(multi-gain-levered)-MQW-DFB-LD에 적용하였다. 이소자는 밴드갭에너지가 다른 3개의 영역으로 구성되어 있으며, 선택MOVPE방법으로 쉽게 제작할 수 있다. Green 함수에 기초를 둔 DFB-LD의 FM응답특성의 해석결과, 평탄하고, 적색편이특성을 가지며, 15GHz/mA이상의 고효율인 FM응답특성이 다중이득레버효과에 의해 기대됨을 알 수 있었다.

### Abstracts

A new method, namely multi-gain-levering, is proposed to improve FM response of the single frequency semiconductor lasers and applied to 1.55 $\mu$ m InGaAsP/InP MGL(multi-gain-levered)-MQW-DFB-LD. This device consists of three sections with different bandgap energy and can be easily realized by selective MOVPE growth. Our analysis based on Green function showed that a flat, red-shifted, high FM efficiency of above 15GHz/mA can be expected by novel gain-levering scheme.

### I. 서론

높은 수신감도와 주파수영역에서 다중화가 가능한 FSK(frequency shift keying) 코히런트광통신은 대용량, 장거리통신이 가능하기 때문에 최근 각광을 받고 있다<sup>[1]</sup>. 이러한 코히런트통신에 요구되는 광원의 특성으로서, 안정된 단일주파수 동작을 기본으로 하여 높은 FM변조효율, 좁은 주파수선평, 고출력동작등이

요구되고 있다. 여러가지 단일주파수 반도체 레이저 다이오드(LD) 가운데 활성영역에 분포반사기를 갖고 있는 DFB(distributed feedback)-LD는 고출력 동작 시에도 안정된 단일파장동작과 좁은 선평이 얻어지기 때문에 코히런트통신용 광원으로서 기대되고 있다<sup>[2-4]</sup>. 그러나 일반적인 DFB-LD의 FM변조효율이 수백 MHz/mA정도로 제한되어 있으며, 또한 약 1MHz 이하의 저주파변조대역에서 열적인 효과(red-shift)와 캐리어에 의한 효과(blue-shift)의 간섭으로 인하여 FM 응답특성에 심각한 불균일한 현상(FM dip)이 나타나며 이는 bit-error-rate를 열화시키는 요인으로 작용되고 있다<sup>[5]</sup>. 따라서 넓은 변조주파수영역에 걸

\* 正會員, 漢陽大學校 電子工學科  
(Dept. of Elect. Eng., Hanyang Univ.)  
接受日字 : 1994年 9月 13日

처 평탄하고 높은 FM변조효율을 갖고 있는 LD를 개발하는 것은 고성능 FSK시스템을 완성하는데 있어서 필요불가결한 기술이라 말할 수 있을 것이다.

DFB-LD의 FM응답특성에 미치는 캐리어의 영향으로서, 공간적인 hole-burning과 비선형 이득<sup>[5]</sup>, MQW(multiple-quantum-well)-DFB-LD에서의 SCH영역에 존재하는 캐리어<sup>[6]</sup>, 이득레버(gain leveraging)<sup>[7]</sup> 등이 거론되고 있다. 또한 FM응답특성을 개선하기 위한 방법으로는 분포반사기의 광결합계수와 공진기길이 L의 적인 L값의 조절<sup>[8]</sup>, 다진극화<sup>[9]</sup>, 캐리어 주입에 따른 이득의 비선형성에 의한 이득레버효과<sup>[10]</sup> 등이 알려져 있다. 이러한 여러방법 가운데 이득레버효과를 이용하는 방법은 타의 방법에 비해 매우 높은 FM변조효율이 기대된다.

본 논문에서는 DFB-LD의 FM응답특성을 개선하기 위하여 다중이득레버(multi-gain-levering)라는 새로운 개념과 이를 이용한 1.5 $\mu$ m InGaAsP/InP MGL(multi-gain-leverd)-MQW-DFB-LD를 제안하였다. 이 소자는 활성층의 밴드갭이 다른 두영역으로 구성되어 있으며, 이런 구조는 선택MOVPE방법으로 비교적 간단히 제작할 수 있다<sup>[11]</sup>. 이 소자의 FM응답특성의 해석으로 부터 종래의 단일전극  $\lambda/4$ -MQW-DFB-LD보다 70배 이상의 고효율이며 넓은 변조주파수영역에 걸쳐 평탄한 FM응답특성이 기대됨을 알 수 있었다.

II절에서는 다중이득레버의 개념과 1.5 $\mu$ m InGaAsP/InPMGL(multi-gain-leverd)-MQW-DFB-LD의 동작원리를 설명하고, III절에서는 FM응답특성의 해석방법, IV절에서는 해석결과 및 검토, V절에서는 본 논문에서 얻어진 결론을 정리하였다.

## II. 다중이득레버(multi-gain-levering)의 개념

LD의 발진은 내부의 모달이득이 모달손실과 같은 조건에서 얻어지게 된다. 따라서 공진기구조내에 미분이득이 큰 영역과 작은 영역을 만들어 미분이득이 큰 영역에서 전류변조를 행하면 미분이득이 작은 영역에서는 많은 캐리어의 변동이 유발되어 높은 FM변조효율이 기대된다. 반도체 레이저의 미분이득의 변화는 활성층의 주입캐리어수와 발진파장의 이득피크에 대한 위치에 따라 변화한다. 활성층의 주입 캐리어수가 적을수록, 발진파장이 이득피크파장보다 단파장영역에 있을수록 미분이득이 크게 된다. 종래의 이득레버효과에 의한 FM변조효율의 개선은 활성층의 주입캐리어수에 따른 미분이득의 변화만을 이용한 반면에, 본 논문에서는

주입캐리어와 발진파장의 위치에 따른 미분이득의 변화를 이용하고 있음으로 leveraging효과 라칭하기로 한다.

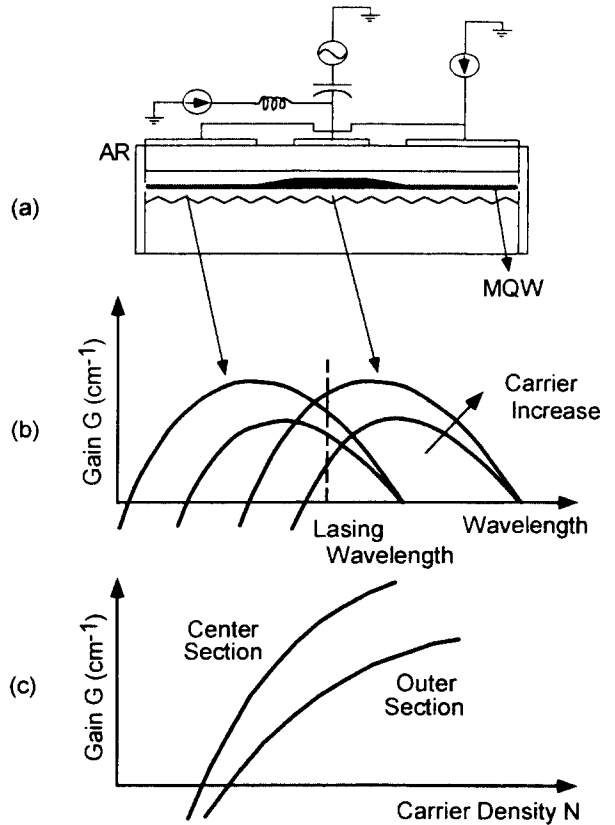


그림 1. (a)1.55 $\mu$ m InGaAsP/InP MGL(multi-gain-leverd)-MQW-DFB-LD의 구조개념도, (b)각영역에서의 이득스펙트럼, (c)발진파장에서의 캐리어수에 따른 각영역에서의 이득의 변화

Fig. 1. Schematic diagrams of the proposed 1.55 $\mu$ m InGaAsP/InP MGL(multi-gain-leverd)-MQW-DFB-LD.

(a) Structure. (b) Gain spectrum in the center and outer sections. (c) Magnitude of the gain at the lasing wavelength in the center and outer sections.

그림1에 본 논문에서 제안된 (a)1.55 $\mu$ m InGaAsP/InP MGL(multi-gain-leverd)-MQW-DFB-LD의 구조도, (b)각영역에서의 이득스펙트럼, (c)발진파장에서의 캐리어수에 따른 이득의 변화를 나타내었다. 1.55 $\mu$ m MGL-MQW-DFB-LD는 한번의 성장으로 활성층의 밴드갭이 서로 다른 영역을 집적화가 가능한 선택MOVPE방법으로 제작되며, 중앙영역의 밴드갭이

외측영역에서 보다 작아지도록 광도파로를 제작한다. 또한 회절격자의 주기와 MQW광도파로 성장조건을 잘 조절함으로써 MQW-DFB-LD의 발진 파장을 두영역의 이득피크 사이에 위치하도록 한다. 본 소자는 3전극으로 구성되며, 중앙영역과 외측의 두영역으로 전극이 분리되어 있다. 미분이득이 적은 외측영역들은 서로 연결되어 있고, 주파수변조는 미분이득이 높은 중앙영역에서만 행해지도록 구성되어 있다. 따라서 중앙영역과 외측영역에 바이어스양을 조절함으로써 주입캐리어수에 따른 종래의 이득레버효과와 이득피크에 대한 발진파장의 위치에 따른 새로운 이득레버효과가 실현가능하며 고효율의 FM응답특성이 기대된다.

### III. FM응답특성의 해석

새로운 이득레버효과를 갖는 MGL-MQW-DFB-LD의 FM응답특성을 해석하기 위해 Green함수에 기초한 DFB-LD의 해석이론을 적용하였다<sup>[12-14]</sup>. 이 방법은 변조주파수에 대한 전체적인 FM응답특성뿐만 아니라, DFB-LD의 어느 부분을 변조하면 어떠한 주파수편이의 FM응답특성이 얻어지는가를 알 수 있는 아주 유효한 해석방법이다. DFB-LD에서의 공진기방향으로의 광강도분포는 FP-LD와 달리 회절격자의 광결합계수의 크기나 주입전류양등에 의해 심각하게 달라지며, 이는 내부캐리어분포를 변화시킨다. 내부캐리어분포는 굴절률분포를 유발시켜 발진모드의 안정성, chirping양, FM응답특성등의 여러가지 DFB-LD의 발진특성에 영향을 주며, 이를 z-HB (z-hole burning)현상이라 한다<sup>[15]</sup>. DFB-LD의 FM응답특성은 먼저 DC동작시의 DFB-LD의 발진경계조건과 결합방정식을 이용하여 DFB-LD내부의 빛의 분포, 이득분포, 캐리어분포, 굴절률분포에 의해 self-consistent한 해를 얻은 후, 빛의 진폭, 빛의 위상, 캐리어수에 대한 3개의 rate 방정식들의 소신호해석을 통해 얻어진다. 본논문에서는 MGL-MQW-DFB-LD의 중앙영역을 10등분, 외측의 2영역을 10등분씩하여, 각각의 세부영역에서는 빛의 강도분포, 캐리어분포, 굴절률분포가 평탄하다고 가정한 모델을 세워 z-HB현상을 취급하였다. 본논문에서 사용한 해석방법과 방정식들은 참고문헌<sup>[12]</sup>과 동일한 것으로 자세한 방정식들의 기술은 생략하기로 한다. 단 참고문헌<sup>[12]</sup>에서는 활성층을 포함한 광도파로구조가 공진기전체에 걸쳐서 균일하다고 가정하여 하였는데 반하여, MGL-DFB-LD에서는 중앙영역과 외측영역에서 서로 다른 광도파로구조로 구성되어 있기 때문에 이득분포와 광도파로구조를 특징을 나타내는 변수(이득스펙트럼, 광구속계수, 등가굴절율등)들을 두영역에서 서로

로 달리 고려하였다는 점이다. 이와같이 공진기축방향으로 상이한 이득스펙트럼이나 광도파로구조를 갖고 있는 MGL-MQW-DFB-LD의 FM응답특성해석은, 중앙영역과 외측영역에서 서로 다른 빛의 복소파수k를 사용함으로써 가능해 진다.

빛의 복소파수 k의 허수부분은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Im(k) = \frac{1}{2}(\Gamma g(w, N, S) - a_i) \quad (1)$$

여기서,  $\Gamma$ 는 광구속계수,  $g$ 은 전력이득,  $N$ 은 well에서의 캐리어 밀도,  $S$ 는 광자밀도,  $a_i$ 는 내부손실이다. MQW구조에서의  $g(\cdot, N, S)$ 는 InGaAs/InGaAsP ( $\lambda g = 1.3\mu\text{m}$ ) MQW구조 (well수=4)로 구성된 발진파장1.55m의 FP-LD의 이득분포를 측정하여 중앙영역과 외측영역에 대해서 각각 아래와 같이 모델링하였다.

먼저 광자밀도  $S$ 에 의한 효과는 일반적으로 비선형 계수를 사용해 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$g(w, N, S) = \frac{g(w, N)}{1 + \epsilon S} \quad (2)$$

각주파수  $w$ 와 활성층의 캐리어수  $N$ 에 대한 이득  $g(w, N)$  의존성은 식(3)과 같이 포물선근사를 사용하였다.

$$g(w, N) = g_p(N) - g_w(N)(w - w_p(N))^2 \quad (3)$$

여기서  $g_p(N)$ 와  $w_p(N)$ 는 이득피크에서의 이득값과 각 주파수이고,  $g_w(N)$ 은 이득스펙트럼의 포물선함수의 기울기이다.

이득피크값  $g_p(N)$ 은 활성층에서의 캐리어수가 적을 경우에는 선형적으로 많을 경우에는 log함수적으로 증가하고, 또한 각주파수  $p(N)$ 은 캐리어수에 따라 선형적으로 증가한다고 아래와 같이 가정하였다.

$$g_p(N) = g_{N_0}(N - N_0) + g_m \ln\left(\frac{N}{N_0}\right) \quad (4)$$

$$w_p(N) = w_p(N_0) + \frac{dw_p}{dN}(N - N_0) \quad (5)$$

여기서  $g_{N_0}$ 와  $g_m$ 은 비례계수이고,  $N_0$ 는 이득값이 양이 되기 시작하는 투명캐리어밀도이다. 이득피크 근처의 스펙트럼의 주입캐리어수의 증가에 따른 변화를 살펴보면, 이득피크파장보다 단파장영역에서의 이득스펙트럼의 변화는 장파장영역에서 보다 넓게 빨리 변한다.

이와같은 현상을 본 해석에서는 이득피크파장을 중심으로 식(4)에서 서로 다른  $g_w(N)$ 을 사용함으로써 해결했다.

$$g_w(N) = \begin{cases} g_{u2} & \text{for } w \leq w_p(N) \\ g_{u0} - g_{u1} \frac{k}{N_0} & \text{for } w \geq w_p(N) \end{cases} \quad (6)$$

여기서  $g_{u0}$ ,  $g_{u1}$ ,  $g_{u2}$ 는 비례계수이다. 식(6)의 의미는 활성층의 캐리어수가 증가함에 따라 이득피크보다 단파장영역에서는 이득스펙트럼의 포물선의 기울기는 커지는데 반해, 장파장영역에서는 변화하지 않음을 의미한다.

빛의 복소파수  $k$ 의 실수부분은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Re(k) = \frac{W_{ref}}{c} \left[ n_{eff} + \Gamma \frac{dn}{dN} (N - N_{ref}) \right] + \frac{n_g}{c} (w - w_{ref}) \quad (7)$$

여기서  $w_{ref} = 2\pi c / \lambda_{ref}$ ,  $\lambda_{ref}$ 는 기준파장,  $N_{ref}$ 는 기준 캐리어 밀도,  $n_{eff}$ 는 유효굴절율,  $n_g$ 는 군굴절율,  $c$ 는 빛의 속도이다.

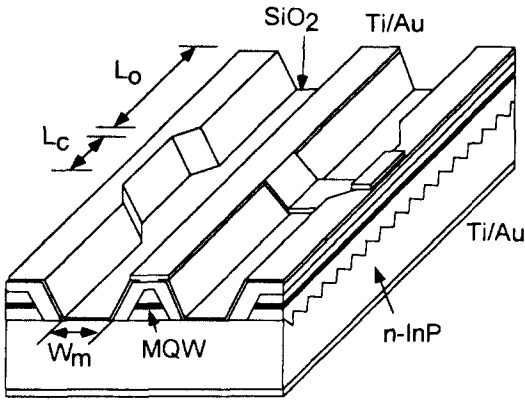


그림 2. 선택MOVPE방법으로 제작가능한 1.55  $\mu\text{m}$  InGaAsP/InP MGL-MQW-DFB-LD의 구조

Fig. 2. Device structure of 1.55  $\mu\text{m}$  InGaAsP/InP MGL-MQW-DFB-LD which can be grown by selective MOVPE epitaxy.

또한 외부전극으로부터 주입되는 전류밀도  $J$ 와 활성층 내부의 캐리어수  $N$ 의 관계는 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$J = ed(AN + BN^2 + CN^3) \quad (8)$$

여기서  $e$ 는 전자의 전하량,  $d$ 는 활성층의 두께,  $A$ 는 LD의 누설계수,  $B$ 는 발광재결합계수,  $C$ 는 Auger재결합계수이다. 다전극 DFB-LD에 있어서 어느 영역을 변조하였을 경우 얼마만큼의 FM변조효율이 얻어지는가를 예측하는데 있어서 다음과 같이  $K_{FM}(z, \Omega)$ 에 의하여 정의된 local FM efficiency 개념은 아주 유효하다.

$$\frac{\delta f(\Omega)}{\delta I} = \frac{1}{l_2 - l_1} \int_{l_1}^{l_2} K_{FM}(z, \Omega) dz \quad (9)$$

여기서  $\delta f(\Omega)/\delta I$ 는 공진축상의  $(l_1 \sim l_2)$ 영역에서 주파수 변조를 행하였을 경우 얻어지는 FM변조효율로서, 단위전류변화당 주파수변조대역을 나타낸다.

#### IV. 해석결과 및 토론

1.55  $\mu\text{m}$  InGaAsP/InP MGL(multi-gain-levered)-MQW-DFB-LD는 한번의 성장으로 밴드갭의 제어가 가능한 선택MOVPE결정성장방법을 사용하여 제작가능하다<sup>[11]</sup>. 균일한 주기를 갖는 회절격자가 형성된 n-InP기판위에 그림2와 같이 [011] 방향으로 패터닝된 2개의 SiO<sub>2</sub> 절연체 패턴 사이의 폭 약 2  $\mu\text{m}$  정도의 영역에 InGaAs/InGaAsP MQW구조를 저압 MOVPE방법으로 성장한다. SiO<sub>2</sub> 절연체의 폭에 따른 밴드갭의 변화와 광도파로구조의 변화는 중앙영역과 외측영역사이에 이득분포차를 초래해 다중이득레버효과를 가능케 하며, 동시에 두영역사이에 굴절율차를 유도해 실효적인 phase-shifted DFB-LD를 형성케 한다. 본 논문에서는 외측영역과 중앙영역에서의 SiO<sub>2</sub> 절연체폭이 각각  $W_m = 6 \mu\text{m}$  와  $W_m = 12 \mu\text{m}$ 로 가정하고 InGaAs/1.3  $\mu\text{m}$ InGaAsP 0(well수=4)로 구성된 1.55  $\mu\text{m}$  MQW-MGL-DFB-LD라 가정하였다<sup>[16]</sup>.

FM변조특성의 해석에 사용된 MQW-MGL-DFB-LD의 구조는 다음과 같다. 전공진기길이( $L_c + 2L_o$ )는 900  $\mu\text{m}$ , 발진파장은 1.55  $\mu\text{m}$ , 중앙영역과 외측영역에 있어서의 well두께는 각각 9nm와 6.5nm, 밴드갭파장은 각각 1.605  $\mu\text{m}$ 와 1.565  $\mu\text{m}$ 로 가정하였다. 중앙영역의 길이  $L_o$ 는 100  $\mu\text{m}$ 로 고정하였으며, 양단면은 무반사막으로 코팅되어 있다고 가정하였다. 활성층의 내부손실은 100  $\text{cm}^{-1}$ , 크래드층에서는 5  $\text{cm}^{-1}$ 로 가정하였다. 중앙영역과 외측영역의 유효굴절율차에 의한 실효적인 phase-shift양은 중앙영역의 길이가 100  $\mu\text{m}$ 인 경우 광도파로해석에 의해 약 0.251가 예상되었으나, 정확한 양의 측정이 불가능 하였으므로 두영역사이의 굴절율차는 00.7% (실효적인 phase-shift양 00.46)까지 변 화시켰다.

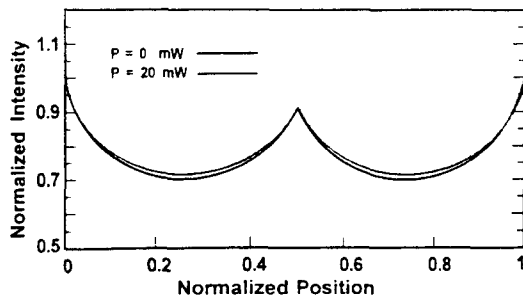
표 1. 해석시 사용된 상수값

Table 1. Lists of parameter values.

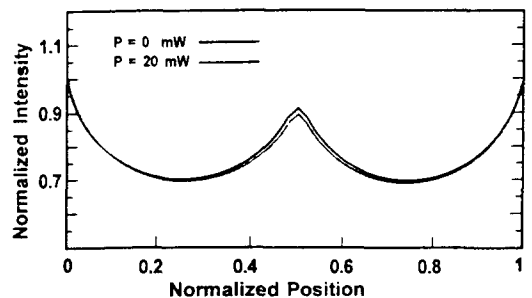
Parameter	Symbol	values		Unit
		Outer Sec.	Center Sec.	
active layer thickness	d	0.026	0.036	$\mu\text{m}$
confinement factor	r	0.0325	0.045	
effective refractive index	n	3.22	$3.22 + \Delta n$	
group index	$n_g$	3.60		
corrugation period	$\Lambda$	240.68		nm
stripe width	W	1.5		$\mu\text{m}$
gain coefficient	$g_M$	$1.15 \times 10^5$		$\text{m}^{-1}$
gain curvature coefficient	$g_{u0}$	$2.5 \times 10^{-28}$		$\text{s}^2/\text{m}$
gain curvature coefficient	$g_{u1}$	$0.7 \times 10^{-23}$		$\text{s}^2/\text{m}$
gain curvature coefficient	$g_{u2}$	$1.7 \times 10^{-23}$		$\text{s}^2/\text{m}$
transparent carrier density	$N_g$	$1.3 \times 10^{24}$		$\text{m}^{-3}$
shift of gain peak	$dw_p/dN$	$1.23 \times 10^{-11}$		$\text{m}^3/\text{s}$
differential refractive index	$dn/dN$	$-1.5 \times 10^{-26}$		$\text{m}^3$
recombination coefficient	A	$1 \times 10^8$		$\text{sec}^{-1}$
recombination coefficient	B	$8 \times 10^{-17}$		$\text{m}^3/\text{s}$
recombination coefficient	C	$7.5 \times 10^{-41}$		$\text{m}^6/\text{s}$
recombination coefficient	$\epsilon$	$2 \times 10^{-23}$		$\text{m}^3$

또한 z-HB효과에 의한 FM변조효율의 damping현상과 고출력시 발생하는 발진모드의 불안정성을 극소화 하기 위하여 L값을 1.2로 하였다. 해석에 사용한 기타상수들을 표1에 나타냈다.

그림3, 그림4, 그림5에 각각 균일전류주입시의 일반적인  $0.35\lambda$ -DFB-LD와 MGL-LD(실효적 phase-shift양= $0.37\lambda$ )의 공진기내부의 빛강도분포, 캐리어 밀도분포, 미분이득분포에 대해서 나타내었다.



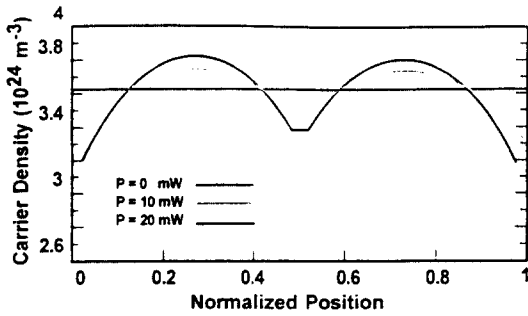
(a)



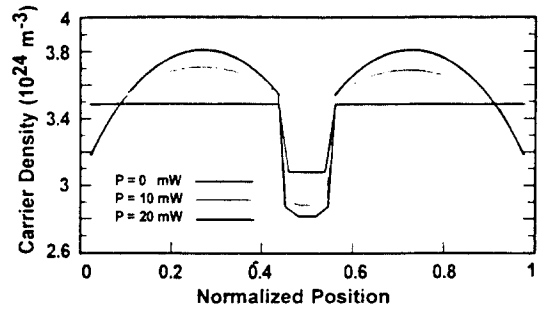
(b)

그림 3. (a)일반적인  $0.35\lambda$ -DFB-LD와 (b)MG L-DFB-LD(실효적 phase-shift양 =  $0.37\lambda$ )에서의 여러 광출력조건에서의 공진기내부의 빛강도분포

Fig. 3. Photon density distributions for the different output power levels in (a) conventional DFB-LD with a discrete phase shift of  $0.35\lambda$  and (b) MGL-DFB-LD with an effective  $0.37\lambda$ .



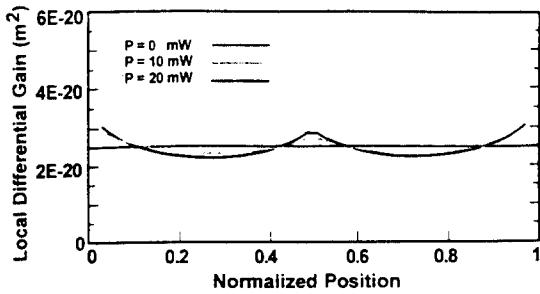
(a)



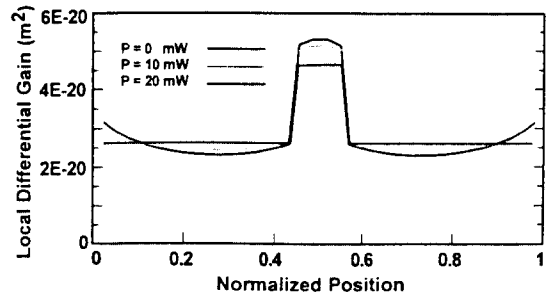
(b)

그림 4. (a)일반적인  $0.35 \lambda$ -DFB-LD와 (b)MGL-DFB-LD(실효적 phase-shift양 =  $0.37 \lambda$ )에서의 여러 광출력조건에서의 공진기내부의 캐리어분포

Fig. 4. Carrier density distributions for the different output power levels in (a) conventional DFB-LD with a discrete phase shift of  $0.35 \lambda$  and (b) MGL-DFB-LD with an effective  $0.37 \lambda$ .



(a)



(b)

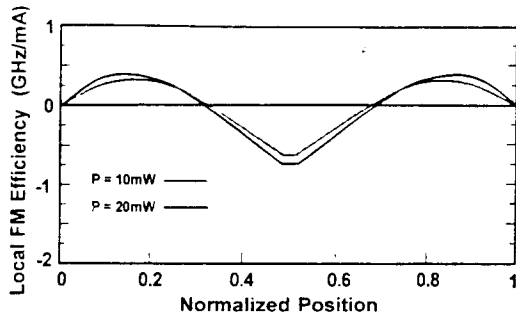
그림 5. (a)일반적인  $0.35 \lambda$ -DFB-LD와 (b)MGL-DFB-LD(실효적 phase-shift양 =  $0.37 \lambda$ )에서의 여러 광출력조건에서의 공진기내부의 미분이득분포

Fig. 5. Differential gain distributions for the different output power levels in (a) conventional DFB-LD with a discrete phase shift of  $0.35 \lambda$  and (b) MGL-DFB-LD with an effective  $0.37 \lambda$ .

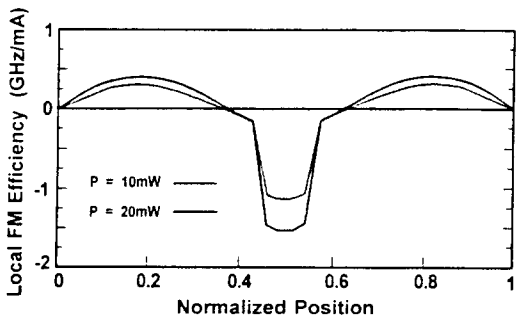
본해석에서는 2종류의 LD에 대하여 동일 phase-shift양을 선정함으로써 동일전류주입시 SMSR(side-mode-uppression-ratio)가 같아지도록 하였으며, phase-shift양을  $0.35 \lambda$  근처로 택한 이유는 뒤에 논하는 바와 같이 FM변조효율을 극대화하기 위함이다. 빛의 강도분포가 phase-shift가 발생하는 중앙영역과 출력단에 집중하여 있으며, 빛의 출력이 증가함에 따라 내부강도분포에 거의 변화가 없는 것으로부터 고효율 시에도 안정된 단일모드 동작이 얻어질 것으로 기대된다. 캐리어의 공간분포는 빛이 강도와 유도방출율의 곱에 반비례하여 빛의 강도분포와 반대로 형성되어 있음

을 알 수 있다. 또한 식(4)로부터 알 수 있는 바와 같이 미분이득은 캐리어수에 반비례하므로 미분이득분포는 빛의 강도분포와 같은 모양을 하고 있다. 또한 내부 캐리어분포와 미분이득의 광출력에 따른 변화를 주시해 보면, 광출력이 적은 영역에서 심하게 변화함을 알 수 있으며 이는 z-HB현상이 발진개시전류근처에서 심하게 발생함을 의미하고 있다. 이득레버효과를 이용해 높은 FM변조효율을 얻기 위해서는 공진기내부에 부분적으로 미분이득이 높은 영역과 적은 영역을 만들어 줄 필요가 있다. 그림5에서 알 수 있는 바와 같이, 일반적인 DFB-LD인 경우는 공진기내부에 미분이득의

분포가 매우 적은 반면에 MGL-DFB-LD인 경우는 이득 분포의 주파수의존성에 의해 매우 큰 미분이득차가 중앙영역과 외측영역에 나타나 높은 FM변조효율이 기대됨을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 6. (a)일반적인 0.35 $\lambda$ -DFB-LD와 (b)MGL-DFB-LD(실효적 phase-shift양 = 0.37 $\lambda$ )에서의 여러 광출력조건에서의 공진기내부의 국부FM변조효율 분포

Fig. 6. Local FM efficiency of (a) conventional DFB-LD with a discrete phase shift of 0.35 $\lambda$  and (b) MGL-DFB-LD with an effective 0.37 $\lambda$  for the different output power levels.

그림 6에 식(9)와 같이 정의된 local FM efficiency  $K_{FM}(z, \Omega)$ 를 나타내었다. 두종류의 DFB-LD 모두에 있어서 공진기전체를 단일전극화하여 진류변조를 행하면 100~200MHz/mA의 매우 낮은 FM변조효율이 얻어짐을 알 수 있다. 또한 중앙영역과 외측영역을 분리한 3전극DFB-LD로 하여 중앙영역에서 변조를 행하면 적색편이(red-shift)가, 외측영역에서 변조를

행하면 청색편이(blue-shift)가 발생됨을 알 수 있다. 따라서 수십kHz~1MHz변조주파수영역에서 발생하는 FM응답특성의 dip현상을 없애기 위해서는, 적색편이가 얻어지도록 중앙영역만을 변조할 필요가 있다<sup>[17]</sup>. 이 경우 밴드갭에너지가 서로 다른 영역으로 구성된 MGL-DFB-LD에서는 그림6(b)에서 알 수 있는 바와 같이  $K_{FM}(z, \Omega)$ 이 전중앙영역의 걸쳐 평탄하고 -1GHz/mA의 높은 값을 나타내고 있고, 따라서 식(9)로부터 MGL-DFB-LD 적색편이특성의 1GHz/mA이상의 매우 높은 FM변조효율이 기대됨을 알 수 있다.

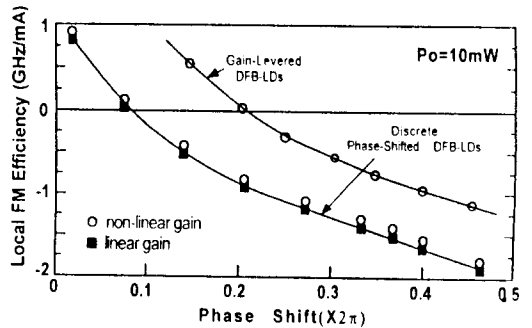


그림 7. discrete phase-shifted DFB-LD와 MGL-DFB-LD에 있어서의 phase shift 양에 따른 중앙영역에서의 국부FM변조효율의 변화

Fig. 7. The effect of discrete and distributed phase shifts on the local FM efficiency at the center region for the conventional and multi-gain-levered DFB-LDs.

Bragg 반사기를 이용한 단일과장 반도체 레이저의 경우에는 이러한 이득레버효과 이외에 분포반사기의 주파수의존성 때문에 phase-shift양과 같은 공진기구조에 따라서도 FM응답특성이 변화한다<sup>[14]</sup>. 그림7에 활성층이 균일한 매질로 구성되어 있는 일반적인 3전극phase-shifted-DFB-LD와 3전극MGL-DFB-LD에 있어서 중앙영역에서만 FM변조를 행할 경우 phase-shift양에 따른 FM변조효율을 나타냈다. 이 그림에서 phase shift양의 변화는 일반적인 DFB-LD에서는 회절격자의 실제적인 phase-shift에 의해, MGL-DFB-LD인 경우에는 중앙영역과 외측영역의 광도파로구조의 차이에서 실효적으로 얻어진다. 적색편이인 FM응답특성을 얻기 위해서는 MGL-DFB-LD인 경우에는 0.1 $\lambda$  이상, 일반적인 DFB-LD인 경우에는 0.2 $\lambda$ 이상의 phase-shift양이 필요함을 알 수 있으며,

두종류 모두 phase-shift양이 증가함에 따라 FM변조효율이 증가함을 알 수 있다. 그러나 phase-shift양이  $0.5\lambda$  혹은 0 근처에서는 FM변조효율이 높다하더라도 일반적으로 알려진 바와 같이 2개의 mode로 발전하게 되기 때문에 실제적인 응용이 불가능하다. 따라서 고출력동작시에도 안정하게 단일파장동작이 기대되며, 높은 FM변조효율이 기대하기 위해서는 phase shift양이  $0.35\lambda$  정도로 설정하는 것이 좋다.

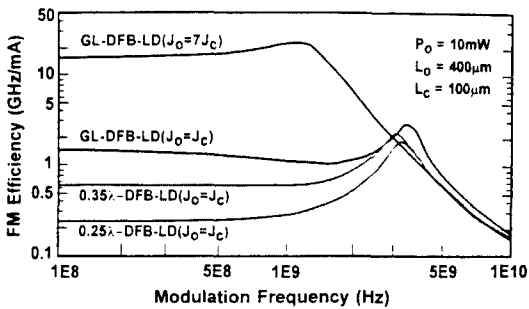


그림 8. 10mW 출력동작시 discrete phase-shifted DFB-LD와 MGL-DFB-LD에 있어서의 해석된 FM응답특성.  $J_c$  와  $J_o$  는 각기 중앙영역과 외측영역에서의 바이어스 전류밀도이다.

Fig. 8. Calculated FM responses of DFB lasers with discrete phase-shifts and multi-gain-levered DFB-LD at 10mW output power.  $J_c$  and  $J_o$  are the injection current density of center and outer sections, respectively.

그림 8에 3전극DFB-LD와 MGL-DFB-LD의 FM 응답특성을 나타내었다. 일반적인 phase-shifted-DFB-LD인 경우 단일모드 안정성이 가장 뛰어난  $0.25\lambda$ -DFB-LD와 FM변조특성이 우수한  $0.35\lambda$ -DFB-LD의 두 경우를 선택하였으며, MGL-DFB-LD인 경우는 실효적인 phase shift양이  $0.37\lambda$ 인 경우를 생각하였다. 중앙영역과 외측영역에 균일한 전류밀도로 바이어스한 경우 ( $J_o=J_c$ )에도 MGL-DFB-LD의 FM변조효율은  $0.25\lambda$ -DFB-LD보다 약6배,  $0.35\lambda$ -DFB-LD 보다 약2배 큰  $1.5\text{GHz}/\text{mA}$ 의 높은 값이 얻어졌으며, 이는 발진파장의 이득피크파장으로 부터의 detuning에 의한 MGL-DFB-LD만에서 얻어지는 새로운 이득레버효과에 의한 것이다. 또한 MGL-DFB-LD의 중앙영역과 외측영역의 바이어스양을 조절하여 캐리어수에 따른 미분이득의 차를 동시에 이용함으로써 더욱 큰 FM변조효율의 개선이 기대된

다. 중앙영역의 캐리어수를 투명캐리어밀도로 하였을 경우 ( $J_o=7J_c$ ), 약  $15\text{GHz}/\text{mA}$ 라는 매우 높은 값이 예상되었다. 이는 종래의 1전극 DFB-LD에서 얻어진 값보다 약 70배, 다전극DFB-LD에서 얻어진 값보다 10배이상 향상된 값이다.

## V. 결 론

DFB-LD의 FM응답특성을 향상시키기 위해 다중이득레버(multi-gain-levering)란 새로운 방법을 제안하였다. 이 방법은 DFB-LD의 공진기내에 미분이득이 큰 영역과 작은 영역을 설치하여, 미분이득이 큰 영역에서 변조를 행하여 미분이득이 작은 영역에서는 많은 캐리어수가 변화하도록 하므로써 높은 FM변조효율을 얻도록 하는 방법임을 지적하였다. 한편, 미분이득의 차이는 발진파장의 이득피크파장에 대한 상대적인 위치와 바이어스전류를 조절함으로써 얻었고, 전자는 본 논문에서 제안한 MGL-DFB-LD만이 갖고 있는 고유의 효과임을 밝혔다. 또한 이러한 다중이득레버효과를 갖고 있는 발진파장  $1.55\mu\text{m}$ 의 InGaAsP/InP MGL-MQW-DFB-LD는 한번의 성장으로 밴드갭제어가 가능한 선택MOVPE방법에 의해 간단히 제작가능함을 지적하였다. 일반적인 3전극  $\lambda/4$ -DFB-LD와 본 논문에서 제안한 MGL-MQW-DFB-LD의 FM응답특성을 해석하고 비교하여 보았다. 그 결과 MGL-MQW-DFB-LD의 FM변조효율이 3전극  $\lambda/4$ -DFB-LD의 값보다, 균일 바이어스조건에서는 약 6배, 불균일 바이어스조건에서는 약 70배이상의 높은 값이 기대됨을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- [1] S. Yamazaki, T. One, H. Shimizu, M. Kitamura, and K. Emura, 2.5Gb/s CPFSK coherent multichannel transmission experiment for high capacity trunk line system, IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 2, pp. 914-916, 1990
- [2] M. Kitamura, H. Yamazaki, H. Yamada, S. Takano, K. Kosuge, Y. Sugiyama, M. Yamaguchi, and I. Mito, High performances and highly reliable  $\lambda/4$  shifted MQW-DFB-DC-PBH-LD for Gb/s coherent optical communication systems, IEEE J. Quantum Electron., vol. 29, no.



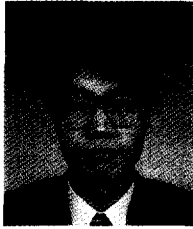
6. pp. 1728-1735, June 1993
- [3] M. Okai, T. Tsuchiya, K. Uomi, N. Chinone, and T. Harada, Corrugation-pitched-modulated distributed feedback laser with ultranarrow (3.6kHz) spectral linewidth, *Electron. Lett.*, vol. 29, no. 19, pp. 1696, 1993
- [4] M. Morinaga, M. funemizu, C. Takakawa, M. Tohyama, S. Baba, and N. Suzuki, Thermal frequency drift suppression in tunable DFB lasers by plasma induced frequency shift enhancement, *IEEE photon. Technol. Lett.*, vol. 6, no. 4, pp. 493-495, Apr. 1994
- [5] S. Kobayashi, Y. Yamamoto, M. Ito, and T. Kimura, Direct frequency modulation in AlGaAs semiconductor lasers, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-18, pp. 582-595, 1982
- [6] H. Yamazaki, M. Yamaguchi, M. Kitamura, and I. Mito, Analysis on FM efficiency of InGaAs/InGaAsP SCH-MQW LD taking injection carrier transport into account, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 3, no. 9, pp. 396, 1993
- [7] K. Y. Lau, Frequency modulation and linewidth of gain-levered two section single quantum well lasers, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 57, no. 20, pp. 2068-2070, Nov. 1990
- [8] M. Kitamura, H. Yamazaki, T. Sasaki, N. Kida, and I. Mito, High-performance 1.5 $\mu\text{m}$  multiple-quantum-well DFB-DC-PBH-LD at 30mW output power for Gb/s range coherent system, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 3, no. 4, pp.305-307, Apr. 1991
- [9] S. Ogita, Y. Kotaki, M. matsuda, Y. Kuwahara, H. Onaka, H. Miyata, and H. Ishikawa, FM response of narrow-linewidth, multielectrode  $\lambda/4$  shift DFB laser, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 2, no. 3, pp. 165-166, Mar. 1990
- [10] K. Y. Lau, The inverted gain-levered semiconductor laser-direct modulation with enhanced frequency modulation and suppressed intensity modulation, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 3, no. 8, pp. 703-705, Aug. 1991
- [11] T.Sasaki, M. Kitamura, and I. Mito, Selective metalorganic vapor phase epitaxy growth of InGaAsP/InP layers with bandgap energy control in InGaAs/InGaAsP multiple-quantum well structures, *J. Crystal Growth*, 132, pp.435-443, 1993
- [12] B. Tromborg, H. Olesen, and X. Pan, Theory of linewidth for multielectrode laser diodes with spatially distributed noise sources, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 27, pp. 178-192, Feb. 1991
- [13] K. Kudo, S. Arai, and J. I. Shim, inewidth reduction of DSM lasers due to effects of composite cavity and distributed reflectors, *IEEE J. Quantum. Electron.*, vol. 29, no. 6, pp.1769-1781, June 1993
- [14] H. Olesen, B. Tromborg, H.E.Lasen, and X. Pan, Mode Instability and linewidth rebroadening in DFB lasers, *Electron. Lett.*, vol. 28, pp. 444-446, 1992
- [15] H. Soda, Y.Kotaki, H.Sudo, H.Ishikawa, S.Yamakoshi, ans H. Imai, Stability in single longitudinal operation in GaInAs/InP phase-adjusted DFB lasers, *IEEE J. Quantum. Electron.*, vol. QE-13, pp. 804-814, June 1987
- [16] J. I. Shim, H. Yamazaki, M. Yamaguchi, and M. Kitamura, 1.5mm InGaAsP/InP multi-gain-levered-MQW-DFB-LD with high efficiency and large bandwidth FM response, 14th IEEE semicon. laser conf., Th1.2, Hawaii, USA, Sept. 1994
- [17] Y. Yoshikuni and G. Motosugi, ultielectrode distributed feedback laser for pure frequency modulation and chirp suppressed amplitude modulation, *J. of Lightwave Technology*, vol. LT-5, no. 4,

pp. 516-552, 1987

---

저 자 소 개

---



沈鍾寅(正會員)

1960年 12月 2日생. 1983年 2月 서울대학교 전자공학과 졸업(B.S.). 1985年 2月 서울대학교 전자공학과 졸업(M.S.). 1992年 3月 동경공업대학 물리전자공학과 졸업(Ph.D.). 1985年 2月 ~ 1988年 1月 한국 전자통신연구소 연구원. 1992年 4月 ~ 1994年 2月 일본전기 (NEC)쯔꾸바 연구소 연구원. 1994年 3月 ~ 현재 한양대학교 공학대학 전자공학과 조교수. 주관심 분야 광통신용 광소자.