

## 분포반사기 레이저 다이오드와 광흡수 변조기가 집적된 소자의 제안 및 해석

권오기 · 심종인

한양대학교 전자공학과

(1998년 8월 4일 받음, 1998년 9월 22일 수정본 받음)

본 논문에서는 기존의 분포배환형 레이저 다이오드와 광흡수 변조기(DFB-LD/EA-MOD.)가 집적된 소자의 낮은 광효율과 수율의 문제점을 해결하고, 동시에 우수한 chirp 특성을 나타내는 분포반사기 레이저 다이오드와 광흡수 변조기(DR-LD/EA-MOD.)가 집적된 소자를 제안하였다. DR-LD/EA-MOD. 집적소자는 제작상으로 DFB-LD/EA-MOD. 소자와 비교해서 선택 MOVPE 성장시 SiO<sub>2</sub> 마스크 폭만 조절하는 것 외엔 거의 동일하므로 실용적 측면에서도 우수하다. 집적소자의 정특성 및 동특성을 해석하기 위하여 시간의존성을 갖는 전달 매트릭스 방법, 활성층내의 비울 방정식, 변조기의 QCSE 효과를 고려한 Schrodinger 방정식을 동시에 풀이하였다. 1.55 μm DR-LD/EA-MOD. 집적소자와 종래 사용중인 1.55 μm DFB-LD/EA-MOD. 집적소자의 성능을 비교 분석하여, LD에 동일전류를 주입할 경우 광변조기의 on 상태의 광출력이 약 30% 이상 향상되고, 동일 광변조기의 잔류단면반사율에 대해 광출력의 ripple이 적고, 동적과장 천이량이 약 50% 이상 줄어들음을 알 수 있었다. 또한 DR-LD/EA-MOD. 소자는 시분할 과장특성은 광 펄스의 leading edge에서 blue-shift, falling edge에서 red-shift 특성이 기대되었다. 이는 일반적인 단일모드 광섬유를 사용하여 광 펄스를 전송할 경우 전송시 펄스 폭이 좁아지는 효과를 주어 이로 인해 전송대역폭을 크게 향상시킬 수 있음을 의미한다.

### I. 서 론

단일과장 반도체 LD(laser diode)의 직접변조를 사용한 광통신 시스템은 LD의 직접 변조시 발생하는 동적과장천이(chirp)와 단일모드 광섬유의 분산특성으로 인해 전송대역폭이 제한되는 문제점이 있다.<sup>[1-3]</sup> 이러한 문제점을 해결하기 위해서, 최근 들어 장거리 대용량 광전송 시스템용 광원으로 외부변조기를 사용하는 경향이 주류를 이루고 있다.<sup>[2-9]</sup> 외부변조기를 사용한 여러 광원들 가운데 선택 MOVPE(Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy) 결정성장을 사용하여 제작된 1.55 μm 분포배환형 레이저 다이오드(distributed-feedback laser diode, DFB-LD)와 광흡수 변조기(electro-absorption modulator, EA-MOD.)의 집적화 소자는 제작이 간단하고, 집적화에 따른 소자의 신뢰성 향상 및 높은 광출력등을 기대할 수 있어 가장 각광을 받고 있다.<sup>[2]</sup> 선택 MOVPE 결정성장법을 사용하면 한번의 MOVPE 결정성장법으로 LD 및 외부 흡수 변조기용 다중 양자우물구조를 얻을 수 있을 뿐만 아니라, LD와 광흡수 변조기 사이의 광결합효율을 거의 100%에 가깝게 할 수 있는 장점이 있다.

일반적으로 1.55 μm DFB-LD와 광흡수 변조기의 집적화 소자는 높은 광출력을 얻기 위해 DFB-LD 단면에 고반사 코팅을 하고 광흡수 변조기 단면에는 저반사코팅을 행한다. 그러나 단면에 고반사막이 코팅된 DFB-LD는 단면에서의 회절격자의 위상과 반사막의 반사율에 따라 발진특성이 크게 변한다. 따라서 소자 제작 후 발진특성을 조사하여 선별해야 하기 때문에 수율이 크게 낮아지는 단점이 있다. 이 집적화 소자에서의 chirp 특성은 광변조기와 DFB-LD 사이의 전기적 분

리 저항과 변조기 단면에서의 반사율에 의해 거의 결정됨이 이미 밝혀져 있다.<sup>[2,9]</sup> 광변조기와 DFB-LD 간 충분한 전기적 분리를 위해 두 소자 사이에 반절연층 사용, clad층의 etching, 소자간의 충분한 간격을 유지하는 등의 방법들이 제안되고 있으나, 절연층 성장공정이 필요하거나 두 소자간 결합효율이 저하 된다는 단점들이 있다. 또한 변조기 단면의 반사율을 충분히 낮추기 위해서는 단면의 절연막 코팅만으로는 불충분하기 때문에 단면에 창구조(window)를 도입하는데, 창구조의 도입으로 인해 광섬유와의 결합효율이 저하된다. 이러한 기존의 문제점들을 해결하기 위해서는 고반사막 제작시 발진특성에 변화가 없으며, 소자간 전기적 분리 및 광배환에 대해서도 우수한 chirp 특성을 나타내는 단일과장 LD가 요구된다.

본 연구에서는 이러한 요구를 만족하며, 제작 공정상 기존의 선택 MOVPE에 의한 1.55 μm DFB-LD/광흡수 변조기 집적화 소자와 거의 유사한 1.55 μm DR(Distributed Reflector)-LD/광흡수 변조기 집적화 소자를 제안하고, 이의 특성에 대해 해석하였다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 II절에서는 제안한 1.55 μm DR-LD/EA-MOD. 집적소자의 제안 및 집적화 소자의 축방향으로의 해석방법과 변조기 해석을 설명한다. 제 III절에서는 기존의 1.55 μm DFB-LD/EA-MOD. 소자와 제안한 1.55 μm DR-LD/EA-MOD. 집적화 소자의 정적 및 동적특성에 대한 해석결과에 대해 비교 분석한다. 마지막 제 IV절에서는 본 연구에서 얻어진 결과를 정리하였다.

### II. 1.55 μm DR-LD/EA-MOD. 집적소자의 제안

#### 2.1. DR-LD/EA-MOD. 집적소자의 제안

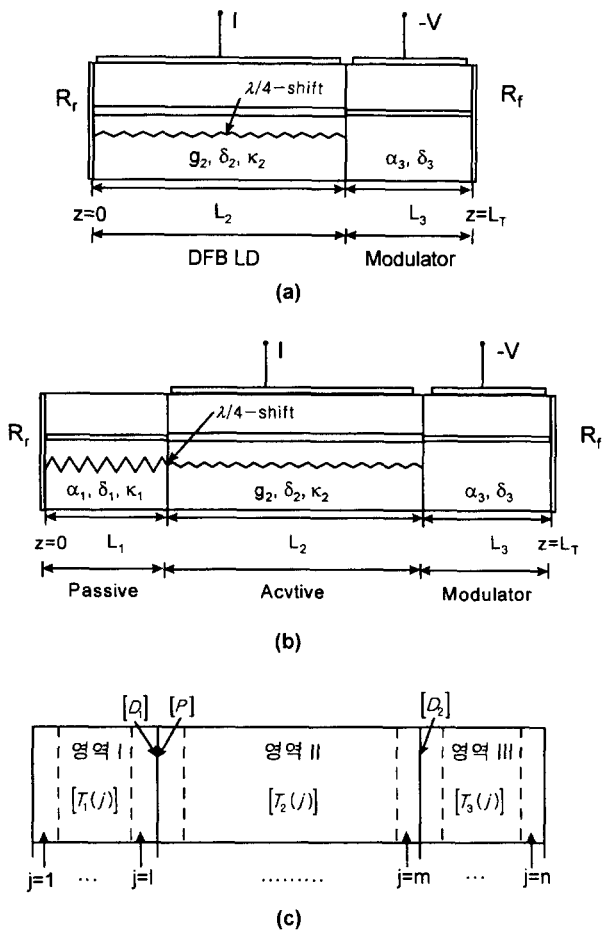


그림 1. 해석시 사용된 model 구조들 (a) DFB-LD/EA-MOD, (b) DR-LD/EA-MOD, (c) 해석구조(I는 수동영역, II는 활성영역, III는 흡수변조기 영역임).

그림 1(a)와 (b)에 DFB-LD/EA-MOD. 집적소자와 본 연구에서 제안한 DR-LD/EA-MOD. 집적소자의 개념도를 나타내었다. 단일모드 반도체 레이저인 DR-LD는 수동 회절격자영역(영역I)과 활성 회절격자영역(영역II)이 서로 집적화 되어 있는 구조로 되어 있다. DR-LD는 DFB-LD의 HR단면 코팅 대신에 고반사의 회절격자를 이용기 때문에, DFB-LD에서 HR 단면의 회절격자의 위상에 따른 단일모드 안정성 문제를 해결할 수 있어 높은 광출력 및 수율을 동시에 얻을 수 있는 장점이 있다.<sup>[1]</sup> 또한 파장에 따른 수동영역 및 활성영역의 거울 손실 변화의 특성을 이용하면 반도체 레이저의 chirp 및 선풍을 결정하는 주된 요소인 선풍증대계수  $\alpha_{eff}$ 를 활성층 구조에 의해 정해지는 물질 선풍증대계수  $\alpha_{H}$  보다 작게 할 수 있는 장점이 있다.<sup>[1]</sup> 그러나 기존에 보고된 DR-LD는 수동영역과 활성영역을 형성할 시 재성장기에 의해 만들어야 하는 번거로움이 있었다.

최근 들어 반도체 기판 위에 SiO<sub>2</sub>와 같은 절연체 막으로 patterning된 InP기판 위에 양자우물구조를 성장시키는 선택 MOVPE 결정성장기술이 광집적소자 제작에 가장 핵심적인 기술로서 자리잡고 있다. 이 기술은 단지 기판 위에 형성된 절연체 마스크만을 변화 시킴으로써 필요한 에너지 밴드갭을 갖

는 광도파로 구조들을 한번의 성장으로 형성 가능케 한다. 본 연구에서는 이러한 점에 착안하여 기존의 선택 MOVPE 결정 성장법에 의한 DFB-LD/EA-MOD. 집적소자의 제작과정과 거의 동일하면서도, DR-LD의 고출력, 저chirp특성, 높은 수율을 동시에 달성할 수 있는 DR-LD/EA-MOD. 집적소자를 제안케 되었다. DR-LD의 제작 공정상 필요한 비대칭 회절격자형성은 유전체 마스크 혹은 선택etching이 가능한 epitaxy층들을 사용하면 쉽게 형성될 수 있으며, 이외의 공정은 거의 동일하다.

2.2. 해석모델

본 연구에서는 제안한 DR-LD/EA-MOD. 집적소자와 DFB-LD/EA-MOD. 집적소자의 정적 및 동적 특성에 대해서 비교 분석 하였다. 해석시 사용된 DR/EA-MOD의 해석구조를 그림 1(c)에 나타내었다. 먼저 소자를 DR-LD의 수동영역(영역 I), DR-LD의 활성영역(영역II), 흡수변조기 영역(영역III)로 나누었다. 회절격자를 이용한 단일모드 반도체 레이저의 경우에는 발진시 공진기 축 방향으로 불균일한 광분포가 형성되어 있기 때문에, 이에 의해 발진특성이 심하게 변화한다. 이러한 z-HB현상을 포함하기 위해서 각각의 영역을 다시 작은 section들로 나누어 생각하였으며, 해석을 간단히 하기 위해서 각 section내에서는 모든 변수가 일정하다고 가정하였다. 전류주입은 DR-LD의 활성영역에만 주입된다고 가정하였고, 따라서 집적화 소자의 이득은 DR-LD의 활성영역에만 존재하게 된다. 본 해석의 타당성 검증 및 DR-LD/EA-MOD. 집적화 소자의 성능을 알아보기 위해서, 기존의 DFB-LD/EA-MOD. 비교하여 보았다. 해석에 사용한 DR-LD 및 DFB-LD는 발진 모드 안정성을 고려하여  $\lambda/4$  phase-shift 회절격자를 사용하였으며, 레이저축 단면은 모두 무반사 코팅되어 있다고 가정하였다. 회절격자의 위치는 DR-LD의 경우 수동영역 I과 활성영역 II사이에, DFB-LD의 경우 활성영역 II의 중앙에 있다. EA-MOD.의 잔류반사율에 의한 chirp특성을 알아보기 위해서 EA-MOD. 단면은 저반사 코팅되어 있다고 가정하였다.

2.3. 정적특성 해석

집적화 소자내의 전계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E(z) = [F(e^{-j\beta_0 z}) + R(z)e^{j\beta_0 z}] \tag{1}$$

여기서, F(z)와 R(z)는 광도파로 내의 전진파 및 후진파의 진폭함수이다.  $\beta_0 = \pi/\Lambda$ 로,  $\Lambda$ 는 회절격자 주기이다.

전달매트릭스를 이용한 결합파동방정식의 해로부터, z=0에서와 z=L<sub>T</sub>에서의 전계 E의 진폭함수 F(z)와 R(z)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} F(z=L_T) \\ R(z=L_T) \end{bmatrix} = \prod_{j=m+1}^n [T_3(j)] [D_2] \prod_{j=1}^m [T_2(j)] [P] [D_1] \prod_{j=1}^l [T_1(j)] \begin{bmatrix} F(z=0) \\ R(z=0) \end{bmatrix} \tag{2}$$

여기서 [T<sub>j</sub>(j)]는 j(=1, 2, ..., n)번째 section에서의 전달매트릭스이고, 첨자 i=1, 2, 3은 각각 수동영역, 활성영역, 변조기영역

을 나타낸다.  $[D_i]$ 는  $i$ 번째 영역과  $i+1$ 번째 영역의 굴절율차에 의해 발생하는 반사를 나타내는 매트릭스이고,  $[P]$ 는 phase-shift를 나타내는 매트릭스이다. 각각의  $[T_i(j)]$ 는 다음과 같다.

$$[T_i(j)] = \begin{bmatrix} \cosh(\lambda_i(j)D) + \frac{\bar{\alpha}_i(j) - j\delta_i(j)}{\lambda_i(j)} \sinh(\lambda_i(j)D_z) & \\ \frac{j\kappa_i}{\lambda_i(j)} \sinh(\lambda_i(j)D_z)e^{j\Omega} & \\ \frac{j\kappa_i}{\lambda_i(j)} \sinh(\lambda_i(j)D_z)e^{-j\Omega} & \\ \cosh(\lambda_i(j)D) + \frac{\bar{\alpha}_i(j) - j\delta_i(j)}{\lambda_i(j)} \sinh(\lambda_i(j)D_z) & \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서,

$$\lambda_i(j)^2 = (\bar{\alpha}_i(j) - j\delta_i(j))^2 + \kappa_i^2 \quad (4)$$

$$\bar{\alpha}_i(j) = (\Gamma_i g_{1,i}(j) - a)/2 \quad (5)$$

$$\delta_i(j) = \frac{2\pi}{\lambda} n_{eff,i}(j) - \beta_0 \quad (6)$$

$\kappa_i$ ,  $\bar{\alpha}_i(j)$ ,  $\delta_i(j)$ ,  $\Gamma_i$ 는 각  $i$  영역과  $j$  번째 section에서의 각각 결합계수, 전계이득, detuning량, 광가둠계수이고,  $\Omega$ 는 초기의 회절격자의 위상이다. 수동영역( $i=1$ )에서는 광이득이 없어  $g_1=0$ 이고, 또한 광변조기 영역( $i=3$ )에서는 광이득 및 회절격자에 의한 광결합이 없으므로  $g_3=\kappa_3=\beta_0=0$ 이다.  $Dz(=L_T/n)$ 는 section 길이로 본 논문에서는  $5 \mu\text{m}$ 로 하였다. 식 (7)의  $[D_i]$ 는 다음과 같다.

$$[D_i] = \begin{bmatrix} \frac{n_{eff,i+1}(k+1) + n_{eff,i}(k)}{2n_{eff,i+1}(k+1)} & \frac{n_{eff,i+1}(k+1) - n_{eff,i}(k)}{2n_{eff,i+1}(k+1)} \\ \frac{n_{eff,i+1}(k+1) - n_{eff,i}(k)}{2n_{eff,i+1}(k+1)} & \frac{n_{eff,i+1}(k+1) + n_{eff,i}(k)}{2n_{eff,i+1}(k+1)} \end{bmatrix} \quad (7)$$

(첨자  $i=1$  or  $2$ )

여기서  $n_{eff,i}$ 는  $i$ 영역의  $j=k$ 번째 section에서의 유효굴절율로,  $i=1$ 이면  $k=l$ ,  $i=2$ 이면  $k=m$ 이다. 또한 매트릭스  $[P]$ 는 식 (8)이며,  $\varphi$ 는 phase shift 량으로  $\lambda/4$ 일 경우  $\pi/2$ 이다.

$$[P] = \begin{bmatrix} e^{j\varphi} & 0 \\ 0 & e^{-j\varphi} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$n_{eff,i}(j) = n_{eff0,i} + \frac{(n_{eff,i}(j) - n_g)}{\lambda_{0,i}} (\lambda - \lambda_{0,i}) - \frac{\alpha_H \Gamma_i \lambda}{4\pi} \left( \frac{dg}{dN} \right)_i N_i(j) + \Gamma_i \Delta n_i \quad (9)$$

$j$ 번째 section에서의 유효굴절율은 식(9)과 같다. 식(9)에서 1항은 각 영역의 캐리어가 없을 때 유효굴절율이고, 2항은 파장변화에 의한 굴절율 변화, 3항은 캐리어의 공간적 분포로 인한 굴절율의 변화, 4항은 변조기에서 흡수변화로 인한 굴절율의 변화량을 나타낸다. 수동영역  $i=1$ 에서는 3항과 4항, 활

성영역  $i=2$ 에서는 4항, 변조기영역  $i=4$ 에서는 3항의 효과는 무시하였다.

반도체 레이저에서 활성층의 캐리어농도와 주입전류와의 관계는 식 (10)의 비율방정식에 의해 결정된다.

$$\frac{dN(z)}{dt} = \frac{\eta_i I}{qV} - (AN(z) + BN(z)^2 + CN(z)^3) - v_g g(z)S(z) \quad (10)$$

$$S(z) = (|F(z)|^2 + |R(z)|^2) \quad (11)$$

여기서  $q$ 는 전하량,  $V(=d_w L_2)$ 는 활성층의 체적,  $I$ 는 주입전류,  $\eta_i$ 는 내부 양자효율,  $A$ 는 캐리어 누설등에 의한 재결합계수,  $B$ 는 자연발출광계수,  $C$ 는 Auger 재결합계수,  $v_g$ 는 광의 군속도이다.  $g(\lambda, z)$ 는 활성층내의 이득으로, 비선형계수  $\epsilon$ 과 parabolic 이득 스펙트럼을 가정하면 식(12)와 같이 쓸 수 있다.

$$g(\lambda, z) = \frac{\frac{dg}{dN}(N(z) - N_0) - A_1[\lambda - (\lambda_p - A_2(N(z) - N_0))]^2}{1 + \epsilon S(z)} \quad (12)$$

식 (12)에서  $N(z)$ 는 캐리어밀도,  $S(z)$ 는 광자밀도,  $dg/dN$ 은 미분이득,  $N_0$ 는 투명캐리어 농도이고,  $\lambda_p$ 는  $N_0$ 에서 이득피크점의 파장이다.  $A_1$ 와  $A_2$ 는 각각 이득 스펙트럼의 폭 및 캐리어 농도 변화에 따른 이득 피크파장 변화를 나타내는 상수이다.

DR-LD/EA-MOD. 집적화 소자의 발진시의 광강도 및 발진 파장은 식 (2)와 다음과 같은 경계조건을 사용하면 해석되어진다.

$$F(0) = r_L R(0) \quad (13)$$

$$R(L_T) = r_R F(L_T) \quad (14)$$

여기서  $r_L$  및  $r_R$ 은 각각  $z=0$  와  $z=L_T$ 에서의 단면에 의한 전계 반사율이다.

광변조기 단면에서 출사되는 광출력  $P_{out}[\text{mW}]$ 은 자기모순 방법으로 얻어진  $z=L_T$ 에서의 광자밀도  $S(z=L_T)$ 를 사용하여 얻어진다.

$$P_{out} = \frac{hc}{\lambda} v_g \frac{d_3 w_3}{\Gamma_3} S(L_T) \quad (15)$$

여기서  $c$ 는 공기중의 광속도,  $d_3$ 과  $w_3$ 은 각각 광변조기의 도파로의 두께 및 폭이다.

#### 2.4. 동적특성 해석

광흡수 변조기의 전압변동에 따른 LD의 광출력 및 발진파장의 변화를 해석하기 위하여, 본 연구에서는 식(2)의 전달메트릭스의 관계를 시간을 포함하는 식으로 개량하였다. 시간이  $t_0$ 초에서  $t_0 + \Delta t$ 초 사이에는 매질이 변하지 않는다고 가정하면,  $z$ 와  $z + \Delta z$ 점 사이의 진행파  $F$  및 후진파  $R$  사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$\begin{bmatrix} F(t_0 + \Delta t, z + \Delta z) \\ R(t_0, z + \Delta z) \end{bmatrix} = [T_i(t_0, z)] \begin{bmatrix} F(t_0, z) \\ R(t_0 + \Delta t, z) \end{bmatrix} \quad (16)$$

여기서  $[T_i(t_0, z)]$ 은 식(2)으로 주어진 매트릭스이다. 식(16)을

사용하면 시간  $t_0$ 에서의 공진기내의 전계  $F(t_0, z)$ 와  $S(t_0, z+\Delta z)$ 로 부터, 시간  $t=t_0+\Delta t$ 에서의  $F(t, z+\Delta z)$ 와  $S(t, z)$ 를 알 수 있다.  $t=t_0+\Delta t$ 에서 단면에서의 진행파  $F(t_0+\Delta t, z=0)$  및 후진파  $R(t_0+\Delta t, z=L_T)$  세기는 식 (13)과 식 (14)의 경계조건으로부터 얻어 진다.  $t=t_0+\Delta t$ 에서 활성층 캐리어 밀도  $N(t, z)$ 는 식 (10)의 시간을 고려한 비율방정식을 풀이 함으로써, 변조기 단면에서 출사된 광출력의 세기  $P_{out}(t)$ 는 식(15)와 식 (16)으로부터 얻어진다. 또한 해석되어진 광자밀도  $S(t, z)$ 와 캐리어밀도  $N(t, z)$ 로부터 발진조건을 만족하는 발진파장 ( $\lambda$ )를 구할 수 있다. 동특성 해석시 해석결과의 정확도와 해석에 필요한 시간 사이에는 서로 trade-off관계가 있다. 이러한 점을 감안하여 본 연구에서는  $\Delta z=5 \mu\text{m}$ ,  $\Delta t=1\text{ps}$ 로 설정하였다.

2.5. 변조기 해석

DR-LD/EA-MOD. 집적소자의 동적특성 해석시 광흡수 변조기의 전압  $V_{mod}$  인가에 따른 손실의 변화  $\Delta\alpha$ 와 굴절율변화  $\Delta n$ 를 알아야 한다. 광흡수형 광변조기는 양자우물구조에 전기장을 인가함으로써 형성되는 흡수 스펙트럼의 변화(QCSE 효과)를 이용한다. 본 논문에서는 QCSE효과 해석에는 여기자 흡수와 3-D carrier에 의한 흡수를 동시에 고려하였다. 양자우물내의 전자의 에너지 밴드는  $k \cdot p$ 이론에 근거해 여기자에 의한 쿨롱력을 포함한 schrödinger 방정식을 FDM(finite difference method)로 해석하였다.

양자우물구조에서의 흡수스펙트럼은 여기자에 의한 흡수  $\alpha_{ex}$ 와 연속준위에 의한 흡수  $\alpha_c$ 의 합으로 표시되며, 본 연구에서는 실험치에 근거를 둔 해석방법을 사용하였다.<sup>[10]</sup> 여기자 및 연속 준위간의 흡수스펙트럼들의 함수에는 Lorentzian과 sommerfeld factor를 사용하였고, 각각의 linewidth 함수는 phonon scattering, well width fluctuation, background doping에 의한 broadening효과들을 고려하였다.

한편 변조기의 인가전압이 변화하면 흡수의 변화( $\Delta n$ )와 동

표 1. 해석시 사용한 물질 상수

변수	의 미	단위	값
$L_1$	수동영역(I) 길이	$\mu\text{m}$	200
$L_2$	활성영역(II) 길이	$\mu\text{m}$	400
$L_3$	흡수변조기(III) 길이	$\mu\text{m}$	200
$d_2$	활성영역 활성층 두께	$\mu\text{m}$	0.03
$d_3$	변조기영역 활성층 두께	$\mu\text{m}$	0.026
$w_2$	활성영역 활성층 폭	$\mu\text{m}$	1
$w_3$	변조기영역 활성층 폭	$\mu\text{m}$	1
$\Lambda$	회전격자 주기	$\text{\AA}$	2,370
$\Gamma_2$	활성영역 광가둠계수		0.1
$\Gamma_3$	변조기영역 광가둠계수		0.08
dg/dN	미분 이득	$\text{cm}^2$	$7.6 \times 10^{-16}$
$A_1$	이득 스펙트럼 폭	$\text{cm}^{-3}$	$0.15 \times 10^{14}$
$A_2$	이득피크 파장변화	$\text{cm}^3$	$2.7 \times 10^{-26}$
$n_{\text{eff},1}$	수동영역 유효굴절율		3.278
$n_{\text{eff},2}$	활성영역 유효굴절율		3.283
$n_{\text{eff},3}$	변조기영역 유효굴절율		3.278
$\epsilon$	비선형 이득계수	$\text{cm}^3$	$3.5 \times 10^{-17}$
$N_0$	투명캐리어농도	$\text{cm}^{-3}$	$1 \times 10^{18}$
$\alpha_{i,2}$	내부손실	$\text{cm}^{-1}$	15.0
$\alpha_H$	물질 선폭계수		5.0
A	비발광 재결합계수	$\text{sec}^{-1}$	$1 \times 10^8$
B	자연방출계수	$\text{cm}^3/\text{sec}$	$8 \times 10^8$
C	Auger 계수	$\text{cm}^3/\text{sec}$	$10 \times 10^{-29}$
$n_g$	군 굴절율		3.7
$\eta_i$	내부 양자효율		1.0

시에 굴절율 변화(n)가 발생하며,  $\Delta\alpha$ 와  $\Delta n$ 은 식 (17)의 Kramers-Kronig 관계가 있다.

$$\Delta n(\lambda, F) = \frac{\lambda^2}{2\pi^2} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\Delta\alpha(\lambda', F)}{\lambda^2 - \lambda'^2} d\lambda' \quad (17)$$

여기서 P는 Cauchy principal value,  $\lambda$ 는 입사파의 파장, F는 전계의 세기를 나타낸다. 변조기에서 전제인가에 의해 발생하는  $\Delta\alpha$ 는 집적소자의 소광비에 영향을 주며,  $\Delta\alpha$ 와 동시에 발생하는  $\Delta n$ 은 식(9)를 통해 LD의 chirp특성에 영향을 준다. 해석시 사용된 물질 상수는 표 1에 정리하였다.

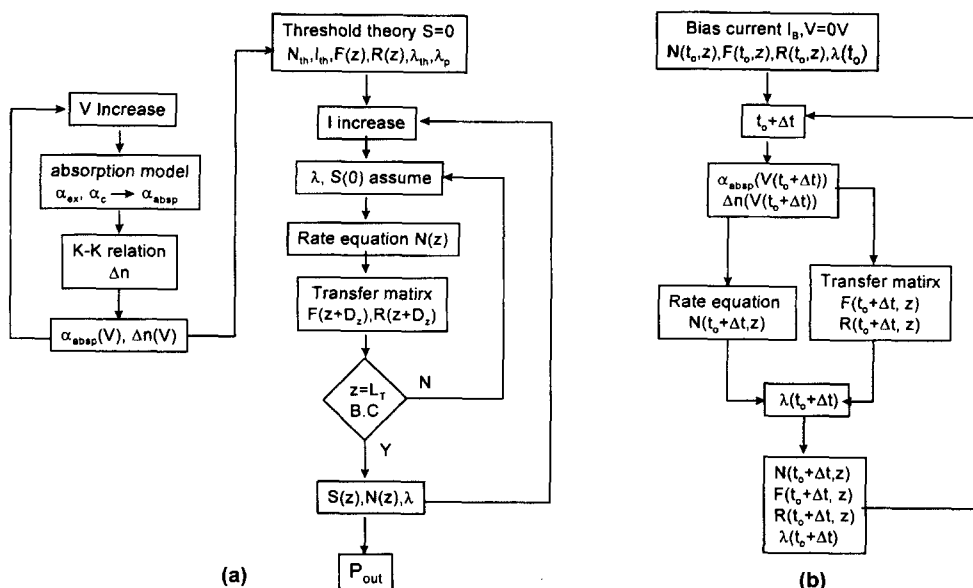


그림 2. (a) 정적특성 흐름도 (b) 동적특성 흐름도.

### III. 해석결과

#### 3.1. 흡수변조기 해석결과

집적소자에 사용한 광변조기의 구조는 Step-SCH InGaAsP/InGaAsP MQW구조로 선택하였다. InGaAsP(well)은 밴드갭 파장  $\lambda_g=1.72 \mu\text{m}$ , 두께  $L_w=70\text{\AA}$ , strain  $\epsilon=+1.0\%$ 이고, InGaAsP(barrier)은  $\lambda_g=1.1 \mu\text{m}$ ,  $L_b=100\text{\AA}$ ,  $\epsilon=-1.0\%$ 로 되어 있는 strain 보상구조이다. well수=8, SCH층 두께=600 $\text{\AA}$ , 변조기의 도파로 총두께=2,460 $\text{\AA}$ 이다. 레이저 입사광은 TE편파이고 발진파장  $\lambda$ 는 1.547  $\mu\text{m}$ 라 가정하였으며, 이 경우 발진파장과 광변조기의 양자화된 밴드갭 파장과 detuning량은 약 60 nm 정도가 된다.

그림 3에서는 변조기 입사광의 발진파장이 1.547  $\mu\text{m}$ 일때 인가전압에 따른 흡수계수 변화( $\Delta\alpha$ )와 굴절률 변화( $\Delta n$ )의 해석결과를 나타내었다. 전압 인가하지 않았을 경우에도 Built-in potential에 의한 MQW구조에 약  $F=40\text{KeV/cm}$  정도의 전계가 발생되고 있으며, 이 때의 기초흡수는 약  $200\text{cm}^{-1}$  정도이다. 역바이어스 전압  $V_{\text{mod}}$ 가 약 -3Volt가 될 때까지는  $V_{\text{mod}}$ 의 감소에 따라 흡수계수가 증가함을 알 수 있었다. 이는 여기자 흡수포크파장( $\lambda_{\text{ex,p}}$ )이 입사광 파장( $\lambda$ )인 1.547  $\mu\text{m}$ 에 가까워지기 때문이다.  $V_{\text{mod}}$ 가 -3Volt 이하로 되면 다시 흡수계수가 감소하게 되는데, 이는  $\lambda_{\text{ex,p}}$ 가 보다 장파장으로 되기 때문이다. 또한  $\Delta\alpha$ 의 변화에 따른  $\Delta n$ 은  $\alpha$ 의 변화가 큰  $V_{\text{mod}} > -2.5\text{Volt}$  영역에서는 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 다음절에서 소개할 집적소자의 정특성 및 동특성해석에는  $V_{\text{mod}}=0\sim -2\text{Volt}$  까지 사용했기 때문에 변조기에서 발생하는 굴절률 변화가 집적소자의 동작특성에 미치는 영향이 거의 없음을 알 수 있었다.

#### 3.2. 정적특성 해석결과

그림 4는 DFB-LD/EA-MOD.와 DR-LD/EA-MOD. 집적화 소자에서 변조기의 인가 전압  $V_{\text{mod}}=0\text{Volt}$ (on-state)와  $V_{\text{mod}}=-2\text{Volt}$ (off-state)일때 주입전류에 따른 광출력 특성을 나타내

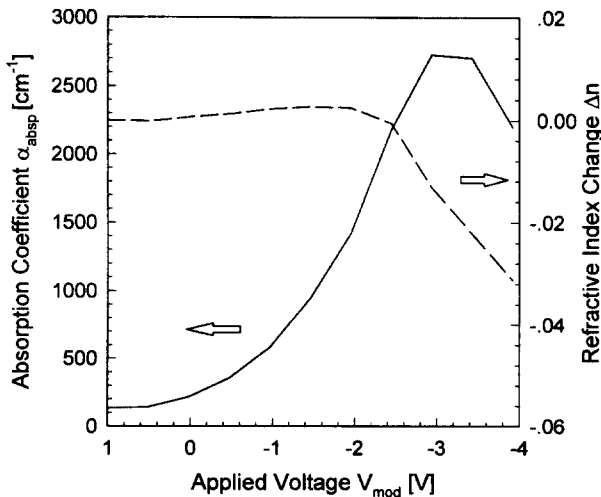


그림 3. 광흡수 변조기의 QCSE효과에 의한 전압인가에 따른 흡수계수 및 굴절률 변화.

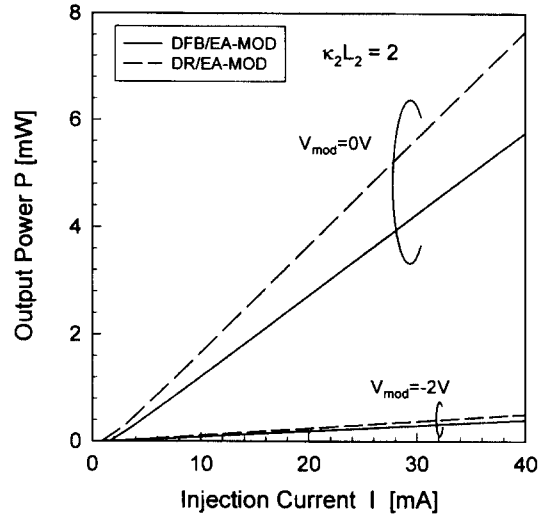


그림 4. DFB/EA-MOD.와 DR/EA-MOD.소자에서 인가전압이 0Volt (on-State)와 -2Volt (off-State)일때 I-L특성.

었다.

해석에는 변조기 단면의 전력반사율이 0.1%, 활성영역의  $\kappa_2 L_2=2$ , DR-LD의 수동영역의  $\kappa_1 L_1=6$ 으로 가정하였다. on-state시 DR-LD를 사용한 경우가 DFB-LD를 사용한 경우에 비해 광출력은 약 30%정도, 발진개시전류는 약 80%이상 향상됨을 알 수 있었다. 이는 DR-LD의 수동영역의 분포반사기가 고반사막으로 작용하기 때문이다. DFB-LD의 경우 레이저 단면에 HR코팅막을 사용하면 DR-LD와 거의 동일한 출력을 얻을 수 있으나, 이 경우 고반사막에서의 회절격자 위상에 따라 발진특성이 심하게 변하기 때문에 수율이 크게 떨어지게 된다.

그림 5는 DR-LD/EA-MOD.와 DFB-LD/EA-MOD.의 활성영역 규격화 결합강도( $\kappa_2 L_2$ )의 변화에 따른 on상태( $V_{\text{mod}}=0 \text{ volt}$ )일때 미분효율과 off상태( $V_{\text{mod}}=-2\text{volt}$ )의 소광특성을

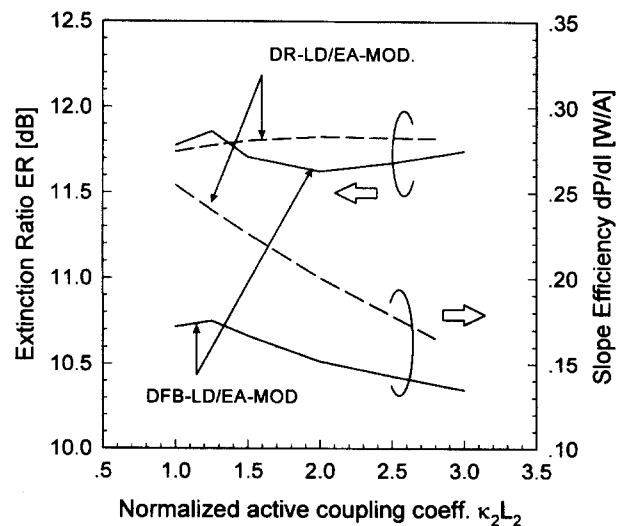


그림 5. 활성영역 규격화결합강도  $\kappa_2 L_2$ 에 따른 소광비(ER)와 미분효율(dP/dI) (Solid line: DFB-LD/EA-MOD., Dashed line: DR-LD/EA-MOD.).

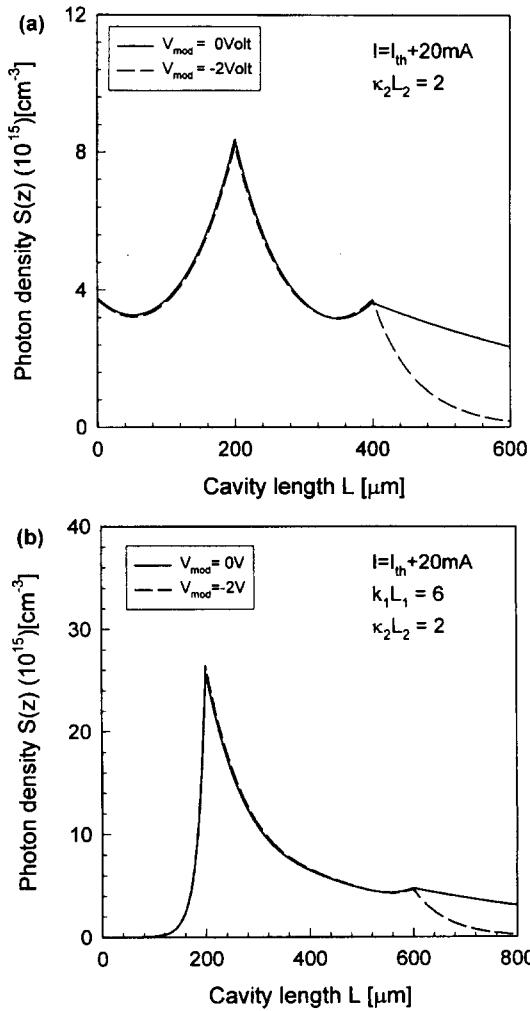


그림 6. 활성영역 결합강도  $2L_2=2$  일때 축방향 광분포 DFB-LD/EA-MOD. (b) DR-LD/EA-MOD.

나타내었다. 해석시 광변조기 단면의 반사율은 0.1%로 가정하였다. DR-LD/EA-MOD는  $\kappa_2L_2$  값에 관계없이 DFB-LD/EA-MOD보다 높은 미분효율을 나타내고 있기 때문에 on상태 시 높은 광출력이 기대된다. 적은  $\kappa_2L_2$ 값에 대해 두 소자의 미분효율의 차는 더욱 증가하게 되는데, 이는  $\kappa_2L_2$ 값이 작을수록 DR-LD의 수동분포반사기에 의한 반사의 효과가 증가되기 때문이다. 변조기 인가전압을 0volt에서 -2volt로 변조했을 때 DR-LD/EA-MOD의 소광비특성이 DFB-LD/EA-MOD보다 다소 높은 11.8dB로 해석되었다. 소광비는 원리적으로 광변조기 흡수특성에 의존하기 때문에 차이가 없을 것이나, 다소 차이가 나는 이유는 단면 잔류반사가 있는 경우 레이저 발진특성이 광변조기 흡수량에 따라 변화하기 때문이다. 그러나 다음절에서 살펴보는 바와 같이 단면에 잔류반사가 있는 경우 레이저의 chirp특성에 영향을 주기 때문에 문제가 된다.

그림 3의 광흡수변조기 특성을 갖는 단일 광변조기인 경우는 소광비가 10dB로 해석되었으나, 집적소자의 경우 1.5dB로 이상 소광특성이 향상되었다. 이 원인은 on과 off시 변조

기내의 광자밀도의 감소특성(On: 선형적 감소, Off: 지수함수적 감소)이 다름에 기인한다. 그림 6에 활성영역 결합강도  $\kappa_2L_2$ 가 2에 대해 on, off시 DFB-LD/EA-MOD와 DR-LD/EA-MOD의 공진기내의 광분포에 대해 나타내었다.

### 3.3. 동적특성 해석결과

단일파장LD와 광흡수변조기 소자들을 집적화하는 이유는 높은 광출력, 소자의 신뢰성 향상, chirp특성 향상 등을 들 수 있다. 집적화 소자에서 출사광의 chirp특성에 영향을 주는 요인으로서 두 소자간의 전기적 분리와 광변조기 단면에서의 잔류반사율이 있다. 이 가운데 잔류반사율에 효과가 두 소자간의 불완전한 전기적 분리에 의한 효과에 비해 제작 공정상의 이유로 많은 영향을 주고 있다. 본 연구에서는 레이저 구조 및 광변조기 단면에서의 잔류반사율에 따른 집적화 소자의 동적특성에 대해서 조사하였다.

그림 7에서는 단면의 반사율에 따른 DFB-LD/EA-MOD 소자와 DR-LD/EA-MOD 소자의 시분할 광출력과 파장천이 특성을 나타낸다. 해석시 그림 7(a)와 (b)에 나타난 두 소자의 활성영역의  $\kappa_2L_2$ 는 2이고, DR-LD/EA-MOD 집적소자의 수동영역의  $\kappa_1L_1$ 은 6이라 가정하였다. 광변조기는 0volt-2volt의 구형파 전압으로 10Gbps로 변조되었으며, on-state에서의 광변조기의 광출력이 2 mW가 되도록 LD의 주입전류를 정하였다. DR-LD 집적화소자가 DFB-LD 집적화소자에 비해 동일 광변조기의 단면반사율에 대해 광출력의 ripple이 적음을 알 수 있다. 이는 변조기 단면에서 반사되어 돌아오는 동일 광량에 대해 DR-LD의 활성층에서 캐리어 농도의 변화가 적음을 의미한다. 따라서 DR-LD/EA-MOD 소자는 DFB-LD/EA-MOD 소자에 비해 총체적인 chirp량의 감소가 예상된다. 그림 7(c)와 7(d)는 각각 DR-LD/EA-MOD 소자와 DFB-LD/EA-MOD 소자의 시분할 chirp특성을 나타낸다. 파장천이의 기준값은 on상태( $V_{mod}=0$ volt)일 때의 발진파장이다. DFB-LD/EA-MOD 소자의 경우에는 광펄스가 off상태에서 on상태로 변화할 때 발진파장이 장파장으로 천이하고 있다. chirp특성은 거의 정현파특성을 나타내고, 스위칭이 일어날 때 약간의 돌출 부분은 변조기의 흡수변화에 수반되는 굴절률변화에 기인한 것이다. 이러한 광펄스의 leading edge에서 red-shift, falling edge에서 blue-shift하는 광펄스를 일반적인 단일모드 광섬유를 사용하여 전송할 경우, 광섬유의 분산특성으로 인해 광펄스가 넓어져 전송대역폭이 제한되는 문제점이 있다. 이에 반해 DR-LD/EA-MOD 소자인 경우 DFB-LD/EA-MOD 소자의 경우와 반대로 chirp특성이 나타남으로 일반적인 단일모드 광섬유를 사용하여 전송할 경우 펄스폭이 좁아져서 전송거리가 상당히 넓어짐이 예상된다. 이러한 DR-LD/EA-MOD 소자의 우수한 chirp특성은 DR-LD에서 수동분포반사기영역을 추가함으로 인해 발생하는 것으로 이에 대해서는 후에 좀더 자세히 설명하기로 한다.

그림 8은 DFB-LD/EA-MOD와 DR-LD/EA-MOD의 on상태의 광출력 2mW이고  $V_{mod}$ 를 0volt-2volt로 10Gbps로 변조하였을 경우, 단면반사율에 의한 chirp의 peak to peak 파장 변화분을 나타내었다. 동일한 단면반사율에 대해 DR-LD/EA-

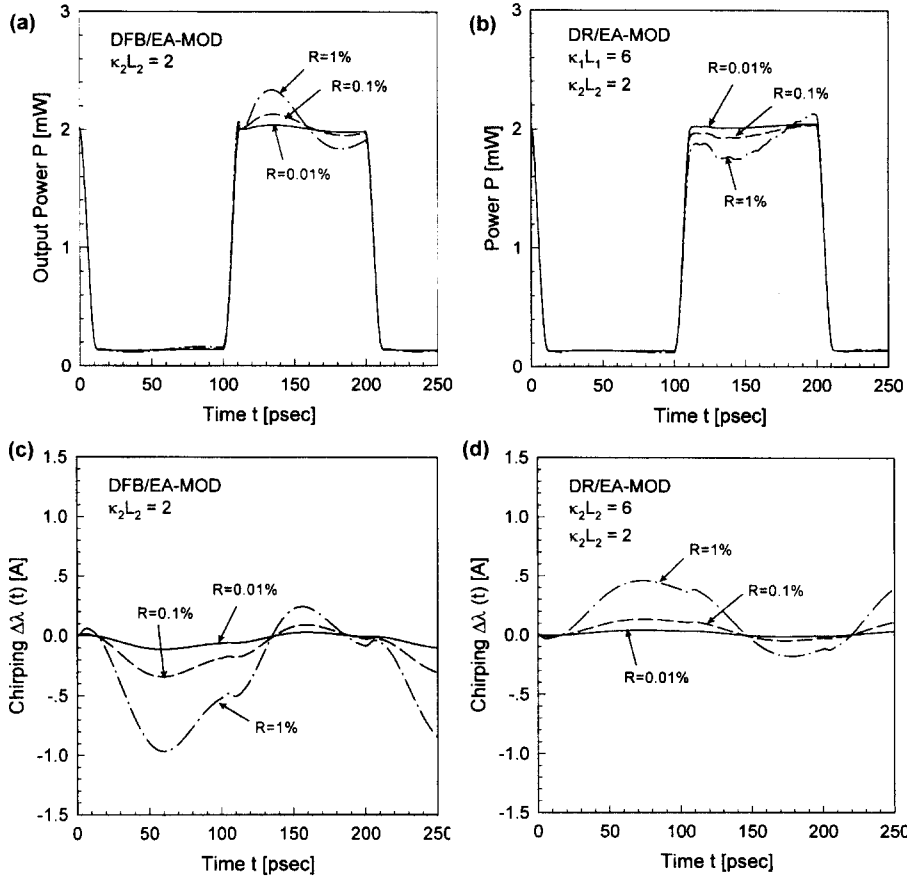


그림 7.  $\kappa_2 L_2=2$ 일때 (a), (c) DFB/EA-MOD와 (b), (d) DR-LD/EA-MOD의 단면 반사율에 따른 광출력과 시분해chirp 특성

MOD소자가 DFB-LD/EA-MOD.소자보다 약 반이상 줄어들음을 알 수 있다. 활성영역의  $\kappa_2 L_2$  값이 증가할 수록 chirp량은 줄어 드는데, 이는 실질적인 단면반사율의 영향이 줄어들기 때문이다. 그러나 chirp양을 줄이기 위해 큰  $\kappa_2 L_2$  값을 사용하면 on상태시 요구되는 광출력을 얻기 위해서는 많은 양의 LD 주입전류가 요구됨으로 주의하여야 한다.

앞서 해석결과로 나타난 DR-LD의 우수한 chirp특성의 원인을 조사하여 보았다. 분포반사기를 이용한 단일모드 반도체 레이저의 chirp특성은 외부 섭동시 발생하는 활성층의 캐리어 변화  $\Delta\lambda_N(t)$ 와 Bragg반사기의 파장의존성  $\Delta\lambda(t)$ 에 의해 나타난다. 이것을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\Delta\lambda(t) = \Delta\lambda_\delta(t) + \Delta\lambda_N(t) = \frac{-1}{A + BN(t)} [\tilde{\alpha}(t, z_{LD}) - \tilde{\alpha}(0, z_{LD})] - \frac{B \lambda(t)}{A + BN(t)} [N(t, z_{LD}) - N(0, z_{LD})]$$

$$\text{where } A = \frac{2\pi n_g}{\lambda^2(t)}, B = \frac{\alpha_H \Gamma}{2\lambda_{02}} \frac{dg}{dN} \quad (18)$$

여기서  $z_{LD}$ 는 축방향으로 레이저와 광변조기 단면을 나타내며, 잔류단면 반사가 LD의 발진파장에 미치는 영향을 알기 위해서 선택된 점이다. 참고문헌[2]-[8]에서는  $\Delta\lambda_\delta(t)$ 에 의한 효과를 무시하였지만, 분포반사기로 구성된 DFB-LD, DBR-LD, 혹은 DR-LD와 같은 단일모드 반도체 레이저의 경우

$\Delta\lambda_\delta(t)$ 의 효과가 매우 크기 때문에  $\Delta\lambda_N(t)$ 와  $\Delta\lambda_\delta(t)$ 의 효과를 모두 고려하여야 한다. 실제  $\Delta\lambda_\delta(t)$ 는 잔류단면반사로 섭동된 광분포가 분포의 재배치로 인한 phase matching condition으로부터 발생하는 양이기 때문에 캐리어의 공간적 변동과 무관하지 않다. 식(18)의 우변의 첫 항은 굴절율의 변동으로 인해 변조기와 레이저 단면에서 발진파장과 Bragg 파장의 차의 변동량을 의미하고, 두 번째 항은 잔류 단면 반사로 인해 변조기와 레이저 단면에서의 내부손실 변화를 의미한다. 따라서 발진파장은 잔류단면반사에 대해  $t=0$ 와 다른 광분포와 내부 손실의 변화로 기준값의 변화(detuning의 변동)와 상대적인 변화(캐리어의 변동)가 동시에 발생함을 알 수 있다.

그림 9은  $\kappa_2 L_2$ 가 2이고 단면 반사율이 0.01%일때 DFB-LD/EA-MOD와 DR-LD/EA-MOD의 chirp 특성을 나타낸다. 두 소자 모두  $\Delta\lambda_\delta(t)$ 의 영향이  $\Delta\lambda_N(t)$ 의 영향 보다 다소 크게 나타남을 알 수 있다. 또한 DFB-LD/EA-MOD.소자는 on상태에서 off상태로 천이하는 경우 광변조기에 의해 발생된 손실로 인하여 내부 캐리어가 증가하여,  $\Delta\lambda_N(t)$ 는 단파장으로 이동하게 된다. 이때 Bragg파장은 내부굴절율의 감소로 인하여 단파장편으로 이동한다. DFB-LD에서는 발진파장과 Bragg파장과의 차는 일정하게 유지되기 때문에 결국  $\Delta\lambda_\delta(t)$  또한 단파장으로 이동한다. 결국 총체적인  $\Delta\lambda(t)$ 는  $\Delta\lambda_N(t)$ 와  $\Delta\lambda_\delta(t)$ 의 합으로 나타나 결국 on상태에서 off상태로 천이하는 경우에는 결국 단파장 편으로 큰 이동이 있게 된다. 이에 반하여 DR-LD/EA-

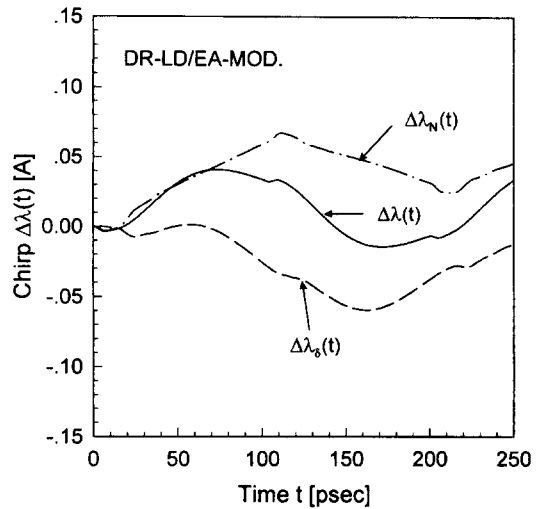
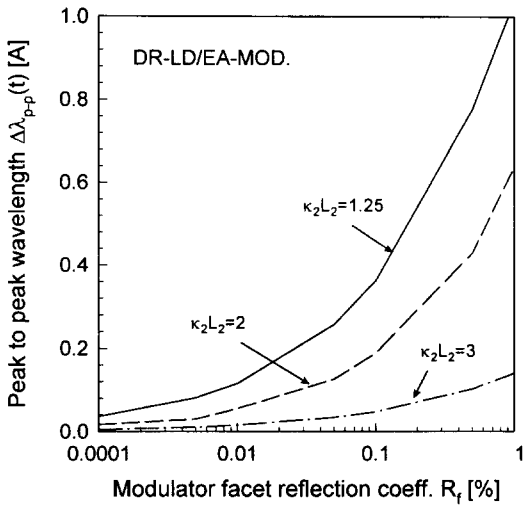
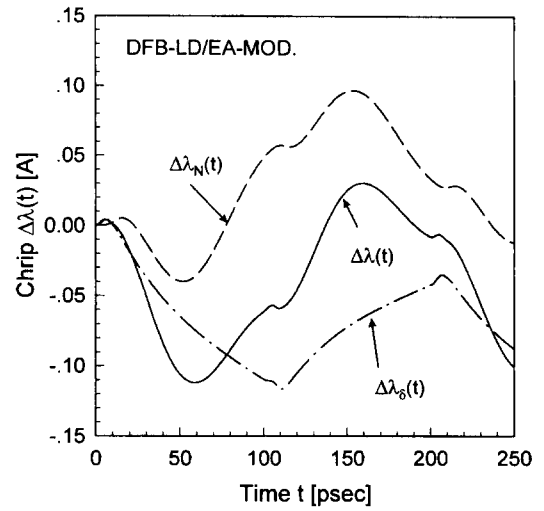
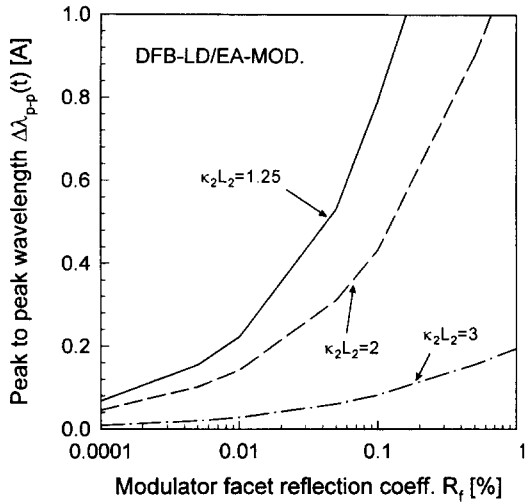


그림 8. DFB/EA-MOD 소자와 DR/EA-MOD 소자 단면반사율과 규격화 결합계수에 따른 peak to peak 파장변화.

그림 9. (a) DFB-LD/EA-MOD, (b) DR-LD/EA-MOD의 동적파장천이특성.

MOD.소자에서는 on상태에서 off상태로 천이하는 경우 광변조기에 의해 내부 손실은 증가하나, 수동분포반사기와 활성분포반사기의 파장의존성에 의해 거울손실이 감소하게 되어 결국 내부손실에는 큰 변화가 없게 된다. 이에 따라 내부 캐리어 변동에 의한  $\Delta\lambda_N(t)$ 의 변화는 거의 무시 가능하다.  $\Delta\lambda_N(t)$ 의 변화가 거의 없다는 사실은 활성분포반사기의 Bragg파장의 변화가 거의 없음을 의미하고, 거울손실이 감소하는 것은 발진파장과 활성영역의 Bragg파장의 간격이 좁아짐으로 발생하는 현상으로 이는 발진파장이 장파장으로 이동했기 때문에  $\Delta\lambda_S(t)$ 는 장파장으로 이동하게 된다.  $\Delta\lambda_S(t)$ 효과가  $\Delta\lambda_N(t)$ 효과보다 크므로 DFB-LD/EA-MOD와 반대 방향으로 chirp특성이 나타나게 된다. DR-LD에서 이러한 chirp특성의 개선은 활성영역의 전파정수  $\beta_2$ 가 수동영역의 전파정수보다  $\beta_1$ 보다 큰 경우에 나타난다.<sup>11)</sup> 본 연구에서는 수동영역에서의 도파로 두께가 활성영역보다 선택 MOVPE성장시 얇게 됨을 감안해 수동영역 및 활성영역의 등가 굴절율을 각각 3.278과 3.283을 사용하였다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 DFB-LD/EA-MOD. 집적소자의 낮은 광효율과 수율의 문제점을 해결하고, 동시에 우수한 chirp특성을 나타내는 DR-LD/EA-MOD. 집적소자를 제안하였다. 또한 DR-LD/EA-MOD. 집적소자 제작은 제작상으로 DFB-LD/EA-MOD.소자와 비교해서 선택 MOVPE성장시 SiO<sub>2</sub> 마스크 폭만 조절하는 것 외엔 거의 동일하므로 실용적 측면에서도 우수하다. 1.55 μm DR-LD/EA-MOD. 집적소자와 기존의 사용중인 1.55 μm DFB-LD/EA-MOD. 집적소자의 성능을 비교 분석하여, 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) DR-LD/EA-MOD.소자는 DFB-LD/EA-MOD.소자에 비해 LD에 동일전류를 주입할 경우, 광변조기가 on상태일때 광출력이 약 30% 이상 향상됨을 알 수 있었다.
- (2) DR-LD/EA-MOD.소자는 DFB-LD/EA-MOD.소자에 비해 동일 광변조기의 전류단면반사율에 대해 광출력의 ripple



이 적고, peak to peak 파장천이량이 약 50% 이상 줄어들 수 있었다.

(3) DR-LD/EA-MOD.소자는 시분할 파장특성은 광펄스의 leading edge에서 blue-shift, falling edge에서 red-shift 특성이 기대되었으며, 이는 DFB-LD/EA-MOD.소자와 반대 경향을 나타낸다.

(4) 일반적인 단일모드 광섬유를 사용하여 DR-LD/EA-MOD.소자의 광펄스를 전송할 경우, 상기(3)의 시분할 특성으로 인해 전송 시 펄스폭이 좁아지는 효과가 기대된다. 이로 인해 전송대역폭을 크게 향상시킬 수 있음이 예상된다.

### 감사의 글

본 연구과제는 한국과학재단 '96특정기초연구 96-0102-07-01-3 연구비 및 한국과학재단 우수연구센터 광전자 연구센터 지원에 수행된 것임.

### 참고문헌

- [1] J. I. Shim, K. Komori, S. Arai, I. Arima, Y. Suematsu, R. Somchai, "Lasing characteristics of 1.5  $\mu\text{m}$  GaInAsP-InP SCH-BIG-DR lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, **27**(6), (1991).
- [2] O. Sahlen, "Optimization of DFB lasers integrated with frantz-keldysh absorption modulators," *J. Lightwave Technol.*, **12**(6), (1994).
- [3] X. Li, W. P. Huang, "Analysis of frequency chirp in DFB lasers integrated with external modulator," *IEEE J. Quantum Electron.*, **30**(12), (1994).
- [4] D. Marcuse, "DFB laser with attached external intensity modulator," *IEEE J. Quantum Electron.*, **26**, pp. 262-269, (1990).
- [5] D. Marcuse, and T. H. Wood, "Time-dependent simulation of a laser-modulator combination," *IEEE J. Quantum Electron.*, **30**(12), (1994).
- [6] M. Aoki, M. Suzuki, H. Sano, T. Kawano, T. Ido, T. Taniwatari, K. Uomi, and A. Takai, "InGaAs/InGaAsP MQW electroabsorption modulator integrated with a DFB Laser fabricated by band-gap energy control selective area MOCVD," *IEEE J. Quantum Electron.*, **29**(6), (1993).
- [7] M. Yamaguchi, T. Kato, T. Sasaki, K. Komatsu, and M. Kitamura, "Requirements for modulator-integrated DFB LD's for penalty-free 2.5-Gb/s transmission," *J. Lightwave Technol.*, **13**(10), (1995).
- [8] J. I. Hashimoto, Y. Nakano, and K. Tada, "Influence of facet reflection on the performance of a DFB laser integrated with an optical amplifier/modulator," *J. Quantum Electron.*, **28**(3), (1992).
- [9] L. M. Zhang, and J. E. Carroll, "Semiconductor 1.55  $\mu\text{m}$  laser source with gigabit/second integrated electroabsorptive modulator," *IEEE J. Quantum Electron.*, **30**(11), (1994).
- [10] P. J. Steven, M. Whitehead, G. Parry, K. Woodbridge, "Computer modeling of the electric field dependent absorption spectrum of multiple quantum well material," *IEEE J. Quantum Electron.*, **24**(10), (1988).
- [11] K. Kudo, S. Arai, and J. I. Shim, "Spectral characteristics of dynamic single mode lasers with complex cavity," *IEEE J. Quantum Electron.*, **29**(7), pp. 1769-1781, (1993).

## Proposal and Analysis of DR(Distributed Reflector)-LD/EA(electro-absorption)-Modulator Integrated Device.

Oh Ki Kwon and Jong In Shim

*Department of Electronic Engineering, Hanyang University, Ansan 425-791, Korea*

(Received August 4, 1998, Revised manuscript received September 22, 1998)

The novel integrated device, 1.55  $\mu\text{m}$  DR-LD(distributed reflector laser diode) integrated EA-MOD (electro-absorption modulator) as light source, is proposed to improve the device yield and its operational performances. This device can be easily fabricated by the selective MOVPE technique and its fabrication processes are almost the same as the reported 1.55  $\mu\text{m}$  DFB-LD(distributed feedback laser diode) integrated EA-MOD except the asymmetric gratings. The static and dynamic properties are investigated simultaneously by solving the transfer matrix method for light propagation, the time-dependent rate equation for carrier change and schrödinger equation for QCSE (Quantum-Confined Stark Effect). The performances of the proposed device such as output power, chirp, and extinction ratio are compared with those of DFB-LD integrated EA-MOD. Under 10Gb/s NRZ modulation, we obtain that DR-LD integrated EA-MOD. is 30% higher in output power on the on-state, about 50% lower in chirp, and slightly larger in extinction ratio than DFB-LD integrated EA-MOD.