

## 1.55 $\mu\text{m}$ InGaAsP/InGaAsP MQW 광흡수 변조기에서 구조변수가 소광특성에 미치는 영향

민영선 · 심종인<sup>†</sup> · 어영선

한양대학교 전자공학과

Ⓣ 425-791 경기도 안산시 사1동 1271번지

장동훈

삼성전자 광전자 사업부

Ⓣ 442-742 경기도 수원시 매탄3동 416번지

(2000년 7월 28일 받음, 2000년 12월 27일 수정본 받음)

초고속 디지털 광통신용 1.55  $\mu\text{m}$  InGaAsP/InGaAsP MQW 광흡수 변조기에서 각종 구조변수들이 광흡수변조기 성능에 미치는 영향을 체계적으로 조사 분석하였다. 일반적으로 행하여지는 양자우물 수  $N_w$ , 양자우물 두께  $t_w$ , detuning 양  $\Delta\lambda$ , 소자 길이  $L$ 과 같은 구조 파라미터들에 더불어 본 연구에서 새롭게 제안한 SCH영역내에 n형으로 도핑된 길이  $t_n$ 가 소자 성능에 미치는 영향을 해석하였다. 이를 통해 소자길이  $L = 100 \mu\text{m}$ 의 광흡수변조기에서 구동전압  $V_a = 0 \sim 2 \text{ V}$ 영역에서 동작하고, 기초흡수  $-1.5 \text{ dB}$ 이하,  $-1 \text{ V}$ 에서  $-2.92 \text{ dB}$  및  $-2 \text{ V}$ 에서  $-10.0 \text{ dB}$  이상의 소광비를 주는 우수한 성능을 갖는 초고속 광흡수 변조기 설계가 가능하였다.

Keywords : OE.020, OE.050.

### I. 서 론

1.55  $\mu\text{m}$  외부변조기는 초고속 변조 시 낮은 chirping의 특성으로 인해, 차세대 장거리 디지털 광통신 시스템의 주요 소자로서 기대되어 진다.<sup>[1-3]</sup> 양자우물구조의 QCSE(Quantum Confined Stark Effect)를 이용한 전계흡수형 광변조기는 우수한 성능 이외에 레이저 다이오드와 같은 다른 광소자와의 집적이 가능하며, 이에 따라 소자의 신뢰성 향상, 높은 광출력, 소형화, 저가 등의 특성을 기대할 수 있어 특히 각광 받고 있다.<sup>[4-6]</sup> 이러한 전계흡수형 광변조기에 요구되는 성능조건으로서 낮은 구동전압, 높은 소광비(ER: Extinction Ratio), 높은 변조속도, 낮은 기초흡수, 적은 chirp 특성등이 있다. 그러나 이러한 특성들은 상호 연관관계를 맺고 있기 때문에 모든 특성을 동시에 만족하기는 매우 어렵다.

낮은 구동전압으로 높은 소광특성을 얻기 위해서는 양자우물수의 증가, 광변조기 길이의 증가, 혹은 여기자 흡수피크파장과 입사광 파장 간격으로 정의되는 detuning 양  $\Delta\lambda$ 의 감소등이 일반적으로 행하여 진다. 그러나 이러한 방법들은 기초흡수를 증가시켜 ON시 광출력의 감소를 가지고 오거나 광변조기의 정전용량의 증가를 가지고 와서 변조속도가 감소되게 된다.<sup>[7-13]</sup> 실제로 수십~수백 km의 장거리 광통신에 사용되는 초고속 광흡수 변조기의 경우 광변조기의 출력광은 수 dBm 정도가 요구되고 있기 때문에 충분한 광출력을 얻기 위해서는 0 V에서의 기초흡수량이 작아야 한다. 또한 광흡수 변조기에

서 20 Gb/s 이상의 충분한 변조대역폭을 얻기 위해 정전용량을 줄이고 취급의 용이함을 감안해 변조기 길이가 약 100  $\mu\text{m}$  정도로 설계할 필요가 있다.<sup>[14]</sup>

더구나 최근 디지털 광통신 시스템의 고속화 및 장거리화 추세로 상기의 기본적인 광변조기 성능 이외에 전송 후에도 뚜렷한 eye-pattern에 대한 요구가 중요한 문제가 된다. 이를 위해서는 신호 전압에 대한 소광특성곡선의 조절이 중요한 설계조건이 되고 있다.<sup>[15]</sup> 수십 Gb/s 이상의 초고속 디지털 광통신 시스템용 광흡수변조기의 구동전압  $V_a$ 은 구동IC의 취급 관점에서 작을수록 좋다. 실제로 반도체 광흡수변조기를 사용한 2.5 Gb/s 혹은 10 Gb/s 광전송 시스템에서는 일반적으로 구동전압의 피크값을 2 V로 규격화하여 사용되어 지고 있다. 광흡수변조기를 0~2 V로 디지털 방식으로 구동하는 경우를 가정하면, 광흡수변조기 변조 신호광에서 큰 eye-opening을 얻기 위해서는 동작전압이  $-1 \text{ V}$  구동전압에서 광출력이 1/2로 감소하고  $-2 \text{ V}$ 에서는  $-10 \text{ dB}$ 이하로 출력광이 거의 나오지 않는 모양이 바람직하다. 즉 반도체 흡수변조기는  $\text{ER} = -3 \text{ dB} @ V_a = -1 \text{ V}$ ,  $\text{ER} < -10 \text{ dB} @ V_a = -2 \text{ V}$ 의 소광특성곡선을 갖는 것이 바람직하다.

본 논문에서는 광흡수변조기의 각종 구조변수들이 소광특성, 변조속도, 기초흡수, 구동전압과 출력광 사이의 선형성 등에 미치는 영향에 대해서 체계적으로 조사하였으며, 특히 SCH영역에 부분도핑이라는 새로운 광변조기의 성능향상 방법을 제시하였다 이를 통해  $\text{ER} = -3 \text{ dB} @ V_a = -1 \text{ V}$ ,  $\text{ER} < -10 \text{ dB} @ V_a = -2 \text{ V}$ ,  $L = 100 \mu\text{m}$ , 기초흡수  $-3 \text{ dB}$ 이내의 구체적인 성능지표를 만족할 수 있는 초고속 광흡수 변조기용 양자우물 구

<sup>†</sup>E-mail: jishim@giga.hanyang.ac.kr

조를 설계하였다. 초고속 통신용 광흡수 변조기의 구조 설계가 있는 소광특성 이외에 소광특성과 Kramers-Kronig 관계로 chirp 특성이 매우 중요한 설계 변수이다. 본 논문에서는 소광특성에 대해서만 도찰하였으며 chirp 특성에 대한 연구 결과는 추후에 별도로 보고하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II절과 III절에서는 광변조기 구조변수들이 광흡수 변조기의 소광특성, 기초흡수량, 신호의 선형성에 미치는 영향에 논한다. IV절에서는 광흡수 변조기에서 각종 구조 파라미터들이 성능에 미치는 영향에 대해서 정성적인 고찰을 행하였으며, 이를 통해 고성능 동작이 기대되는 초고속 광흡수 변조기를 설계하였다. 마지막 V절에서는 본 연구에서 얻어진 결과를 종합하였다.

## II. 구조 파라미터들의 소광특성

In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As<sub>y</sub>P<sub>1-y</sub>(well)/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As<sub>y</sub>P<sub>1-y</sub>(barrier)로 구성된 양자우물(Quantum-Well)구조에서 전계인가 시 발생하는 흡수계수의 변화는 참고문헌 [16]을 따랐다. 이에 strain인가 시 발생하는 가전자대의 밴드구조의 변화, 여기자 흡수, linewidth broadening효과, 이중접합의 조성조합에 따른 band offset의 변화등의 효과가 고려되어 있다. 전계흡수형 변조기를 설계하기 위해서는 여러 개의 변수를 조절할 필요가 있다. 그림 1에 나타난 다중양자우물구조(MQW)의 에너지 밴드구조를 구조를 기본으로 하여 구조변수들이 광변조기 성능에 미치는 효과를 살펴보았다. 이 구조는 1.55 μm의 TE편파의 입사광에 대하여 어느 정도 최적화된 구조이다. 이는 반도체 흡수변조기는 DFB(distributed-feedback)-LD(Laser Diode)와 집적화하여 주로 사용되고 있으며, DFB-LD의 발진광은 주로 TE편파로 동작하기 때문이다. 특별한 언급이 없는 한 SCH영역과 MQW영역은 모두 intrinsic 영역(즉, t<sub>n</sub>=0 nm), 광흡수 변조기 길이 L=100 μm, 도파로폭 W=1.0 μm, 입사광 파장과 V<sub>a</sub>=0 Volt에서의 여기자 흡수피크의 차인 detuning 양 Δλ는 50 nm라 가정하였다. 다음은 각종 구조파라미터들이 광흡수 변조기의 성능에 미치는 영향에 대해서 논의한다.

### 2.1. 양자우물 수 N<sub>w</sub>

그림 2에 양자우물수 N<sub>w</sub>를 변화시켰을 경우 예상되는 소광

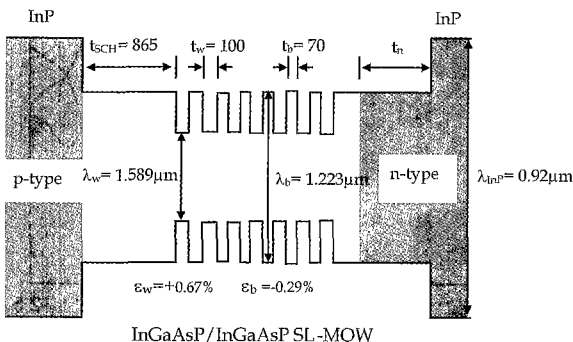


그림 1. 해석에 사용된 기본 InGaAsP/InGaAsP 다중양자우물의 에너지 밴드 다이어그램.

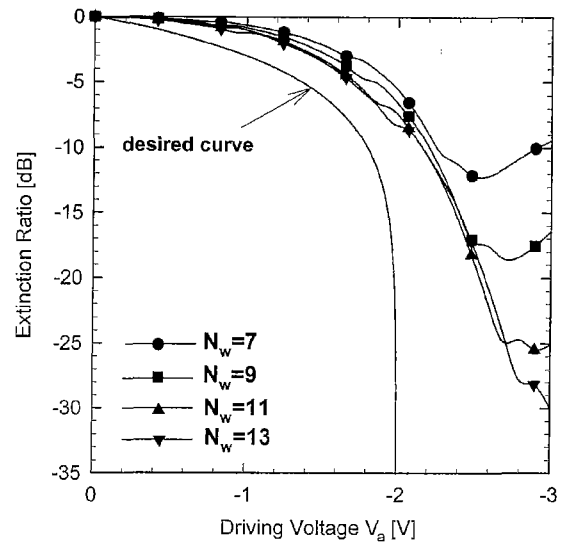
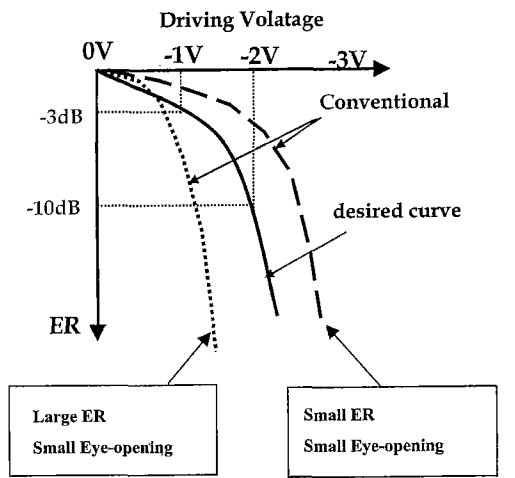


그림 2. 양자우물의 수 N<sub>w</sub>에 따른 소광비 특성.

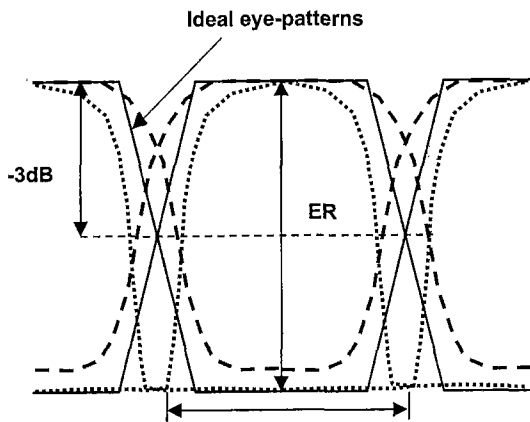
특성곡선의 변화를 나타내었다. N<sub>w</sub>가 증가할수록 OCF(Optical Confinement Factor)가 증가하여 소광특성이 좋아지는데 반해 기초흡수 α<sub>i</sub>가 커져서 V<sub>a</sub>=0 V에서의 출력광 파워 값이 줄어드는 단점이 예상된다. 광도파로 해석결과 N<sub>w</sub>=7에서 OCF(Optical Confinement Factor) 값은 13.5%이고, N<sub>w</sub>가 하나씩 증가함에 따라 3~4%정도의 OCF값이 선형적 증가하게 된다. 그러나 ER [dB]는 동일 인가전압 V<sub>a</sub>에 있어서 N<sub>w</sub>에 따라 선형적으로 증가하지 않는다. 이는 N<sub>w</sub>에 따라 동일 V<sub>a</sub>에 대해 각각의 양자우물에 가하여 지는 전계세기 E가 줄어들어 QCSE효과가 달리 나타나기 때문이다. 그림 2에서 V<sub>a</sub>>-2.3 V인 영역에서는 N<sub>w</sub>에 대해 그리 큰 특성차이가 없으며, N<sub>w</sub>가 증가함에 따라 동일 V<sub>a</sub>에 대해서 각각의 양자우물에 전계 E가 약하게 작용해 흡수계수변화가 적게 일어나기 때문이다. 또한 V<sub>a</sub><-2.3 V에 대해서는 서로 다른 값에서 최소가 된 후 다시 증가하는 현상을 볼 수 있다. 그림에서 최소의 소광비를 보이는 점은 여기자 흡수피크가 입사광 파장인 1.55 μm와 일치하는 점이고 이보다 더 큰 V<sub>a</sub>를 인가하였을 경우는 흡수계수가 다시 줄어들기 때문이다. 최소 소광비를 보이는 전압이 N<sub>w</sub>가 증가할 수록 더 작아지게 되는 이유는 ER에서의 이유와 마찬가지로 동일 V<sub>a</sub>에 대해 양자우물에 가하여 지는 전계값이 N<sub>w</sub>에 따라 변화되기 때문이다. 그림에서 디지털 광통신용 흡수변조기에 바람직한 소광특성곡성도 함께 그려 놓았다. 이 곡선은 V<sub>a</sub>=-1 V에서 소광비 E.R. = -3 dB 이고, V<sub>a</sub>=-2 V에서 E.R.<-10 dB 보다 작아지도록 되어 있으며 그림 3에서 알 수 있는 바와 같이 back-to-back 측정 시 eye opening이 가장 크게 나타나는 경우에 해당된다. 광흡수 변조기를 V<sub>a</sub>=0~-2 V 영역에서 구동하는 경우에는 N<sub>w</sub>의 의존성이 거의 없기 때문에, 후술하는 바와 같이 기초흡수 α<sub>i</sub>가 적도록 양자우물 수 N<sub>w</sub> 선택하는 것이 유리하다고 할 수 있다.

### 2.2. 양자우물 두께 t<sub>w</sub>

그림 4은 N<sub>w</sub>=7로 하고, 양자우물의 두께 t<sub>w</sub>=80 Å~120 Å



(a) 소광특성 곡선들



(b) 예상되는 back-to-back eye pattern

그림 3. 광흡수 변조기에서 소광특성곡선에 따른 back-t-back 측정 시 예상되는 eye-pattern.

까지 변화시켜 가면서 모의실험한 결과를 나타내었다. 양자우물의 물질조성이 일정한 상태에서  $t_w$ 가 변화하면 밴드갭이 변화하여 detuning양  $\Delta\lambda$ 가 변화하게 된다. 따라서 그림 4의 해석 시에는 그림 1의 구조에서 각각의  $t_w$ 에 대해  $\Delta\lambda = 50 \text{ nm}$ 로 일정하게 되도록 양자우물의 조성을 변화시켰다.  $t_w$ 가 증가하게 되면 OCF, QCSE효과, 내부손실  $\alpha_i$  등이 커질 것으로 예측된다. OCF값  $\Gamma$ 는  $t_w = 80 \text{ \AA}$ 에서 일 때 11%였으며,  $t_w$ 가 10  $\text{\AA}$ 가 늘어남에 따라 약1%~1.5% 증가하였다. QCSE효과에 의한 양자우물에서의 양자화 에너지 전이는 에 비해한다고 알려져 있기 때문에, 특히  $t_w$ 의 증가는 구동전압을 낮추는 효과가 있을 것으로 예측된다. 그림 4로 부터  $t_w < 100 \text{ \AA}$  영역에서는  $t_w$ 의 증가는  $V_a < -2 \text{ Volt}$ 에서의 소광특성 향상에 많은 효과가 있음을 알 수 있다. 그러나  $t_w > 100 \text{ \AA} \sim 110 \text{ \AA}$ 에서는 소광특성이 포화되거나 오히려 열화되는 것을 알 수 있다. 이는 너무 두꺼운 양자우물에서의 전자의 양자화 효과의 감소에 따른 여가자 구속력이 약해지기 때문이다. 따라서  $V_a < -2 \text{ V}$ 에서 높은 소광비를 얻을 수 있는 양자우물의 두께  $t_w$ 는 100  $\text{\AA} \sim 110 \text{ \AA}$  정도가 적당함을 알 수 있다.

### 2.3. 파장 detuning $\Delta\lambda$

입사광 파장  $\lambda$ 와 여기자 흡수피크 파장  $\lambda_{ex}$ 과 입사광 파장의 차이로 정의되는 detuning 양  $\Delta\lambda (= \lambda - \lambda_{ex})$ 는 소광비 특성에 특히 많은 영향을 미칠 것으로 예측된다. 그림 5에  $\Delta\lambda$ 에 따른 소광특성을 나타내었다. 해석 시 그림 1의 MQW구조를 대상으로 하였으며, 소자의 길이  $L = 150 \mu\text{m}$ 로 하였다.  $\Delta\lambda$ 는 조절은 양자우물의 조성을 변화시켜  $\lambda_{ex} = 1.49 \mu\text{m} \sim 1.52 \mu\text{m}$ 로 변화하도록 하였다. 그림 5로 부터  $\Delta\lambda$ 는 감소는 다른 설계 변수에 비해 구동전압의 저감 및 소광비의 향상을 동시에 달성할 수 있는 설계변수라는 것을 알 수 있다. 따라서 높은 소광비와 낮은 구동전압을 동시에 달성하기 위해서는 우선적으로  $\Delta\lambda$ 를 조절하는 것이 효과적이다. 단  $\Delta\lambda$ 가 너무 작아지면 기초흡수 및 hole pile-up현상이 증대하는 단점이 있기 때문에,

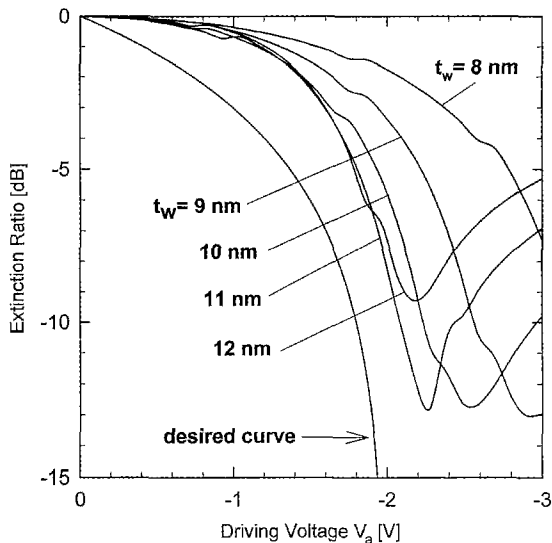


그림 4. 양자우물의 두께  $t_w$ 에 따른 소광비 특성변화. 해석시  $N_w = 7$ ,  $\Delta\lambda = 50 \text{ nm}$ ,  $L = 100 \mu\text{m}$ 로 고정하였다.

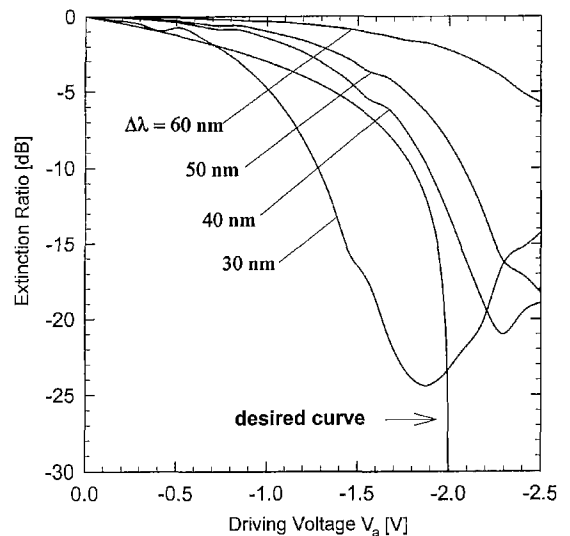


그림 5.  $\Delta\lambda$ 에 따른 소광비 특성.  $L = 150 \mu\text{m}$ , 입사광을 TE편파의  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  빛이라 가정하였다.

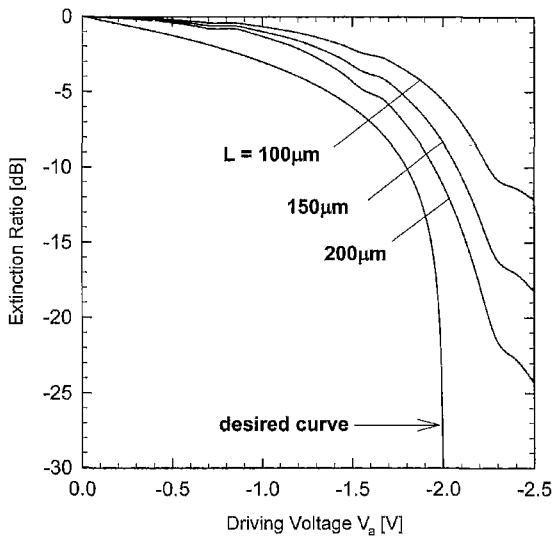


그림 6. 소자길이 L에 따른 소광비 특성.

기초흡수량이 설계치를 넘지 않는 범위내에서  $\Delta\lambda$  값을 조절해 주어야 한다.

#### 2.4. 소자 길이 L

높은 소광비를 얻기 위해서는  $\Delta\lambda$  양을 조절하는 방법 이외에도 소자의 길이 L을 조절하는 방법이 있다. 일반적으로 L을 늘리면 높은 소광비를 얻을 수 있지만, 기초흡수가 증대하고 소자의 정전용량이 늘어나기 때문에 변조대역폭이 좁아지는 단점이 있다. 그림 6에 그림 1의 구조에 대해 소자의 길이  $L = 100 \mu\text{m} \sim 200 \mu\text{m}$ 까지 변화시켜 모의실험한 결과를 나타내었다. 소자의 길이가 늘어남에 따라 높은 소광비를 얻을 수 있다. 소자길이는 구동전압과 관계가 없고, ER는 소자길이 L과 지수함수적으로 관계가 있기 때문에 그림에서와 같이 소광비 [dB]가 소자길이에 따라 선형적으로 관계에 있게 된다.

#### 2.5. SCH층의 도핑위치

수십 Gb/s의 초고속에서 동작하는 디지털 IC를 구동하기 위해서는 가능한 한 구동전압이 낮을수록 좋다. 특정 다중양자우물 구조에 대해서 적은 인가 전압으로 큰 소광특성을 얻기 위해서는 특정인가전압에 대해 양자우물에 걸리는 전계의 세기를 강하게 하여 줄 필요가 있다. 일반적인 광흡수변조기의 제작은 불순물에 의한 광흡수손실을 줄여주기 위해서 주로 SCH를 포함한 도파로영역에 불순물 도핑을 행하지 않는 것이 일반적이다. 그러나 SCH영역에 도핑을 행하면 같은 인가 전압에 대해 전계의 세기를 조절할 수 있으나 아직 이에 대한 특성 변화에 대해 거의 보고된 바가 없다. InGaAsP계 물질에서는 n형 Si 불순물은 확산계수가 매우 작기 때문에 도핑위치를 성장하면서 매우 정확히 제어할 수 있고 잉여 광손실이 매우 작은 반면에, p형 불순물인 Zn는 확산계수가 커서 도핑위치를 제어하기 힘들고 가전자대간 흡수등과 같은 잉여 광흡수손실을 발생시킨다. 이러한 특징에 착안하여 본 연구에서는 n층 SCH영역에 n형 Si를 부분도핑함으로써 다중양자우물에 걸리는 전계의 세기를 증가시켜 소광특성 향상을 꾀하였다. 그

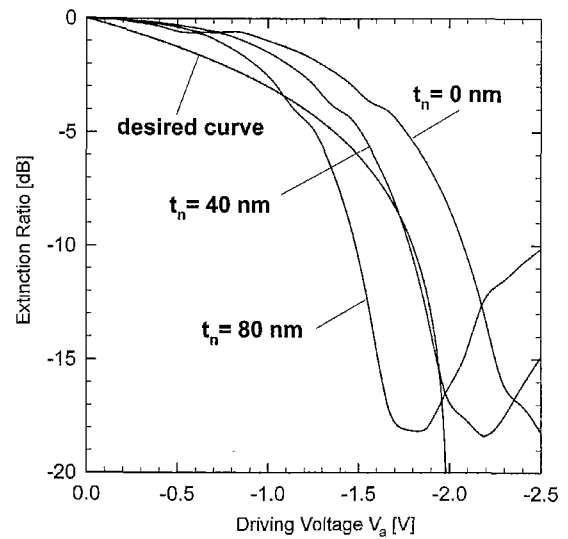


그림 7. n층 SCH영역에서 Si를 부분도핑 길이  $t_n$ 에 따른 소광특성의 변화.

림 7은 그림 1에 나타낸 바와 같이 n층 SCH영역내에서의 n형도핑영역 길이  $t_n$ 에 따른 소광특성곡선의 변화를 보여준다. 해석 시 소자길이  $L = 150 \mu\text{m}$ 이고, p층 SCH영역과 MQW층은 intrinsic영역이라고 가정하였다.  $t_n$ 이 증가함에 따라 소광특성이 향상되고 있음을 알 수 있다. SCH 부분도핑에 의한 소광특성곡선의 변화는 소광특성곡선의 모양은 변화하지 않으면서 구동전압만이 낮아지고,  $V_a = -1 \text{ V}$ 와 같이 낮은 전압에 대해서 큰 소광비를 얻을 수 있는 특징이 있어 그림 3에서 도시한 바와 같이 디지털 통신용 변조기 광출력의 명료한 eye-opening을 얻기 위해서 특히 유용한 방법이라고 생각된다.

### III. 기초흡수량 및 ER특성곡선

광흡수변조기에 있어서 인가전압  $V_a = 0$ 에서 발생하는 기초흡수량에 영향을 주는 구조 변수로서는 양자우물 수  $N_w$ , 양자우물 두께  $t_w$ , detuning  $\Delta\lambda$  양, 소자길이 L 등이다. 그림 8에 각각의 구조변수에 따른 인가전압  $V_a = 0 \text{ Volt}$ 에서의 기초흡수량을 나타내었다. 해석 시 그림 1의 구조를 기본 구조로 하였으며 입사파로서는 TE편파의 파장  $1.55 \mu\text{m}$  광,  $L = 100 \mu\text{m}$ ,  $t_n = 0 \text{ \AA}$ ,  $\Delta\lambda$  변화 시를 제외하고는  $\Delta\lambda = 50 \text{ nm}$ 로 고정하였다.

ER는  $N_w$ 에 따라 기초흡수량은 거의 선형적으로 증가하나  $t_w$ 에 따라서는 well width fluctuation과 같은 linewidth broadening 함수에 영향을 미쳐서 기초흡수량은 OCF의 증가를 초래함에도 불구하고 오히려 줄어 드는 경향을 보인다. 반면 ER는 앞서 논의한 바와 같이  $N_w$ 는 거의 영향이 없고,  $t_w$ 는 다소 영향이 있었다. 따라서 초고속 광흡수변조기의 설계 시  $N_w$ 는 기초흡수량 측면에서,  $t_w$ 는 ER 측면에서 선택하는 것이 유리함을 알 수 있다.  $\Delta\lambda$ 를 조절할 경우는 exciton peak파장의 이동으로 기초흡수 및 ER에 동시에 큰 변화가 있게 된다.  $\Delta\lambda$  값이 적을수록 큰 소광비가 기대되지만 기초흡수도 역시 급격히 증가하게 된다. 일반적으로  $\Delta\lambda < 30 \text{ nm}$  영역에서는 기초흡수량이  $-4 \text{ dB}$ 이하가 되기 때문에  $V_a = 0 \text{ V}$ 에서의 광출력

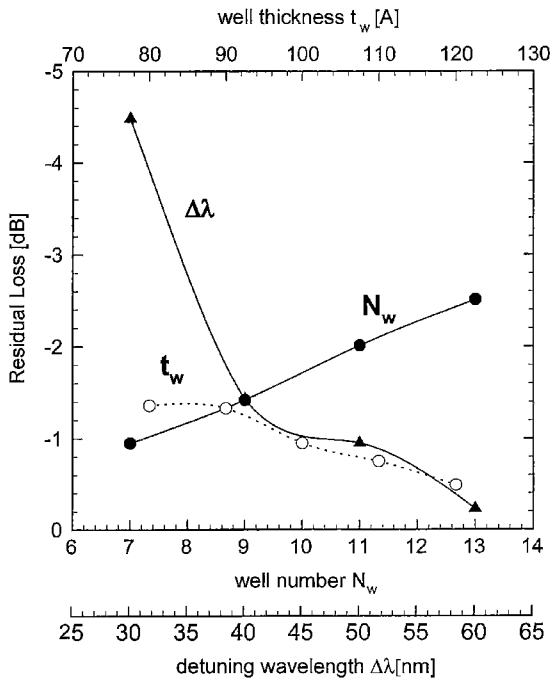


그림 8. 설계변수들에 따른 기초흡수량의 변화.

값이 크게 감소되게 된다. 반면 ER는 약 피크 구동전압에 대해서 일정량 이상만 되면 되기 때문에  $\Delta\lambda$ 의 하한치를 기초흡수량에 의해 제한하는 것이 유리하다. 광변조기 길이 L에 대해서는 L에 따라 기초흡수량은 선형적으로 변화하기 때문에 그림에서 생략하였다.

전계흡수형 광변조기의 경우 입가전압  $V_a$ 와 소광비 ER의 관계는  $V_a$ 가 적을 경우 ER 값은 적게 변하고  $V_a$ 가 어느 정도 커지면 급격히 줄어드는 특성을 보인다. 이러한 소광비 특성 곡선은 수십 Gb/s급에서 동작하는 디지털 광변조기 출력광의 eye-opening을 줄여 신호의 BER(Bit-error-rate)를 열화시키는 원인이 된다. 광흡수변조기 출력 신호광의 큰 eye-opening을 얻기 위해서 광변조기의  $V_a=0\sim-2V$  구동시  $V_a=-1[V]$ 에서  $ER=-3[dB]$ 의 소광비와  $V_a=-2[V]$ 에서는  $ER=-10[dB]$  이상의 급격한 특성을 보이는 것이 바람직하다.

그림 9과 그림 10에 각종 구조 파라미터들이  $V_a=-1V$  및  $-2V$ 에서 ER값에 미치는 영향을 나타내었다. 해석 시 사용한 조건은  $\delta\lambda=40nm$ 로 고정한 점 이외에는 그림 7의 해석 시와 동일하다.  $V_a=-1[V]$ 에서  $ER=-3[dB]$  정도의 큰 소광비를 얻기 위해서는 그림 9로부터  $\Delta\lambda$ 를 줄이거나  $t_n$ 을 증가하는 것이 매우 유효함을 알 수 있다. 또한  $V_a=-2V$ 에서  $ER<-10dB$ 를 얻기 위해서는  $t_w$ 의 증가,  $\Delta\lambda$ 의 축소,  $t_n$ 을 증가하는 방법이 유효함을 알 수 있다. 일반적으로는  $\Delta\lambda$ 를 줄이는 방법은 모든  $V_a$ 에 대해서 ER의 빠른 변화를 얻는데 매우 유효하다. 그러나  $\Delta\lambda$  값이 너무 작은 경우에는 기초흡수량도 대폭으로 증가하기 때문에  $\Delta\lambda$  값만으로 ER 곡선을 제어하는 것은 좋지 않다.  $t_w$ 는  $V_a=-1V$ 와 같이 낮은 인가전압에 대해서는 별로 ER가 크지 않은데 반해서  $V_a=-2V$ 와 같이 큰 인가전압에 대해서는  $t_w$ 에 따라 급격히 변화한다.

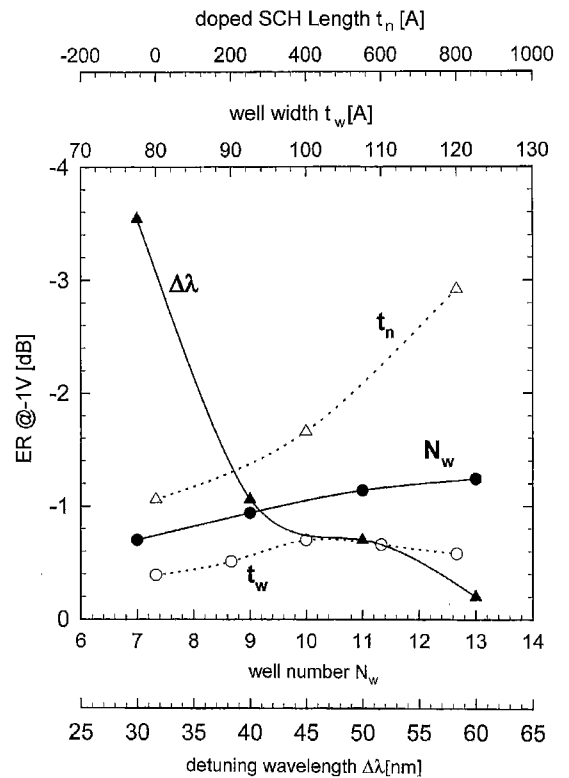


그림 9. 설계변수들에 따른 구동전압  $V_a=-1V$ 에서의 소광비.

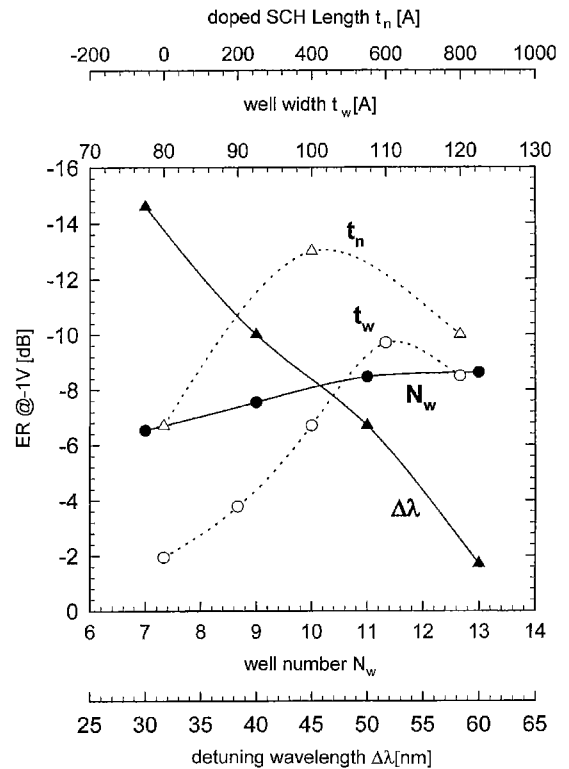


그림 10. 설계변수들에 따른 구동전압  $V_a=-2V$ 에서의 소광비.

따라서 피크전압에서만 큰 ER를 얻기 위해서는  $t_w$ 를 증가시키는 것이 매우 유효한 방법이다.  $t_n$ 을 조절하는 방법은

$V_a = -1$  Volt에서  $ER = -1 \sim -3$  dB 영역의 값을 주고, 또한  $V_a = -2$  Volt에서  $ER < -10$  dB와 같은 큰 소광비를 동시에 얻을 수 있다. 또한  $\Delta\lambda$  변화 시와는 달리  $t_n$ 이 변화하는 경우에는 기초흡수량이 거의 변화하지 않는다는 장점이 있다. 물론  $t_w$  혹은  $\Delta\lambda$ 가 잘 설계되어 있지 않은 MQW 구조에 대해서는  $t_n$ 만의 조절로 우수한 디지털 통신용 광변조기 성능을 달성하기는 어렵다. 따라서 디지털 초고속 디지털 광통신용 광변조기의 출력광 신호에 큰 eye-opening을 얻기 위해서는 특히  $t_w$ ,  $\Delta\lambda$ ,  $t_n$ 를 필요한 성능 명세에 따라 적절히 조절해 줄 필요가 있다.

#### IV. 초고속 광흡수변조기용 구조 설계

II절과 III절에서 고찰한 1.55 μm InGaAsP/InGaAsP MQW 광흡수 변조기의 구조변수가 광변조기 성능에 미치는 영향에 대해서 정성적인 이해를 돕기 위해 표 1에 요약해 놓았다. 여기서는 인가전압  $V_a = 0 \sim -2$  Volt에서 디지털로 동작하는 광변조기를 대상으로 하였다.  $V_a = -1$  Volt에서  $ER \approx -3$  dB를 얻기 위해서는  $\Delta\lambda$ ,  $t_n$ , L 등의 조절변수가 있다.  $V_a = -2$  Volt에서  $ER < -10$  dB를 얻기 위해서는  $t_w$ ,  $\Delta\lambda$ , L,  $t_n$ 의 조절변수가 있으며, 소자의 변조속도를 높이기 위해서는 L의 감소가 필수적이다. 또한  $t_w$ 와  $t_n$ 은 기초흡수량에 미치는 영향은 거의 무시할 수 있음을 알 수 있다.

이상의 고찰을 토대로 디지털 광통신 시스템용 광흡수 변조기를 설계해 보았다. 여기서는 높은 소광비, 빠른 변조속도, 신호의 선형성, 낮은 기초흡수량 등의 특성을 동시에 만족하는 구조를 찾고자 한다. 구체적으로는 구동전압  $V_a = -1$  V에서 -3 dB의 소광비,  $V_a = -2$  V에서 -10 dB 이상의 소광비, 변조기 길이  $L \leq 100 \mu\text{m}$ 이내, 기초흡수 -3 dB이내의 성능지표를 만족할 수 있는 초고속 광흡수 변조기를 설계하고자 한다. 모의실험은 표 1의 정성적인 고찰에 따라 양자우물 수  $N_w$ , 양자우물 두께  $t_w$ , detuning 양  $\Delta\lambda$ , 부분도핑 길이  $t_n$ 의 순서로 행하였다. 설계변수의 선정에는 그림 8, 그림 9, 그림 10의 모의실험결과를 사용하였다.  $N_w$ 에 따라 -1 V와 -2 V에서의 소광비는 양자우물의 개수에 큰 영향을 받지 않았지만, 기초흡수는 증가하는 단점이 있다, 따라서 본 연구에서는  $N_w = 7$ 로 선정하였다.  $t_w = 80 \text{ \AA} \sim 120 \text{ \AA}$  영역에서  $t_w$  증가에 따라 기초흡수는 작아지지만,  $t_w = 100 \text{ \AA} \sim 110 \text{ \AA}$ 에서 가장 큰 소광특성을 나타내었다. 여기서는  $t_w$ 가 두꺼울수록 균일한 활성층을 성장하기가 어려운 점을 감안하여 여기서는  $t_w = 100 \text{ \AA}$ 를 선택하였다.  $\Delta\lambda$ 는 기초흡수가 -3 dB보다 작으면서도 가장 큰 소

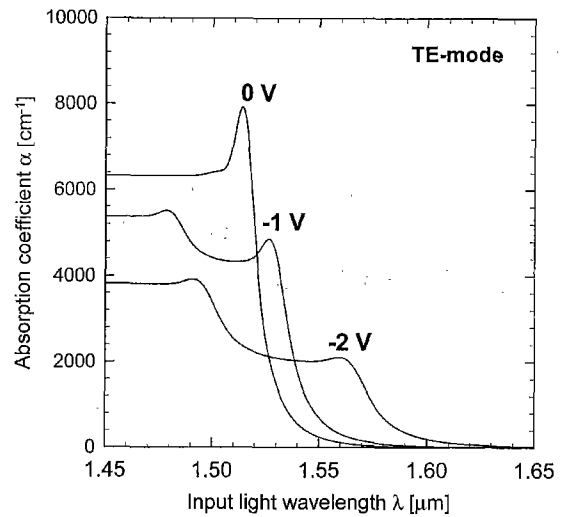


그림 11. 설계된 광흡수 변조기의 인가전압에 따른 흡수곡선.

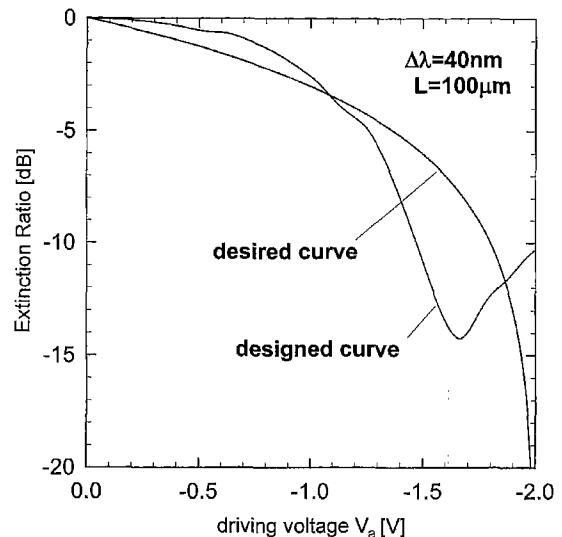


그림 12. 설계된 광흡수 변조기의 소광특성.

광비 특성을 주는 관점에서  $\Delta\lambda = 40 \text{ nm}$ 를 선택하였다. n형으로 도핑된 SCH 영역의 길이  $t_n$ 에 따라서는 기초흡수에는 영향을 미치지 않으므로, 소광비 영역만을 살펴보면 된다. 설계조건에 따라 -1 V에서의 소광비는 약 -3 dB이고, -2 V에서 -10 dB 이하가 되는  $t_n$ 의 조건으로서는  $t_n = 800 \text{ \AA}$  인 경우가 유효함을 알 수 있었다. 이상과 같이 설계된 1.55 μm InGaAsP/InGaAsP MQW 광흡수변조기의 인가전압  $V_a$ 에 따른 흡수계수의 변화를 그림 11, 광흡수 변조기의 소광특성을 그림 12에 각각 나타내었다. 수십 Gb/s로 동작가능토록 소자길이 100 μm로 설계된 광흡수 변조기에서 -1 V에서 -2.92 dB, -2 V에서 -10.0 dB의 소광비, 기초흡수 -1.428 dB의 값을 예측되어 당초 설계 목표치를 도달할 수 있음을 알 수 있었다.

#### V. 결 론

초고속 디지털 광통신 시스템용 1.55 μm InGaAsP/InGaAsP

표 1. 1.55 μm InGaAsP/InGaAsP MQW 광흡수 변조기에서 상기의 각종 설계변수가 소광특성에 미치는 영향

|                   | well number<br>$N_w \uparrow$ | well thickness<br>$t_w \uparrow$ | detuning<br>$\Delta\lambda \uparrow$ | device length<br>$L \uparrow$ | SCH doping length<br>$t_n \uparrow$ |
|-------------------|-------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| High ER           | ×                             | ○                                | ○                                    | ○                             | ○                                   |
| High Speed        | △                             | ○                                | ○                                    | ×                             | ○                                   |
| Signal Linearity  | △                             | △                                | ○                                    | △                             | ○                                   |
| Low Residual Loss | ×                             | △                                | ×                                    | ×                             | △                                   |

○ : good effect, △ : little effect, × : bad effect.

MQW 광흡수변조기 설계를 목적으로 양자우물 수  $N_W$ , 양자우물 두께  $t_w$ , detuning 양  $\Delta\lambda$ , 소자길이  $L$ , SCH 도핑위치와 같은 광흡수변조기의 설계변수들이 변조기성능에 미치는 영향에 대해서 체계적으로 조사하였다. 이의 결과  $N_W$ 는 기초흡수량,  $t_w$ 는 소광비의 특성,  $\Delta\lambda$ 는 기초흡수량,  $L$ 은 소자의 변조가능 속도에 의해 주로 결정됨을 알았다. 본 연구에서 제시한 SCH영역내에 n형으로 도핑된 길이  $t_n$ 을 조절하는 방법은 특히 인가전압을 낮추는데 매우 효과적임을 알 수 있었다.

수십Gb/s이상의 동작 가능한  $L=100\mu\text{m}$ 의  $1.55\mu\text{m}$  InGaAsP/InGaAsP MQW 광흡수변조기 설계를 광흡수변조기 출력 신호광의 큰 eye-opening을 위해 구동전압  $V_a=-1\text{V}$ 에서  $-3\text{dB}$ 의 소광비,  $V_a=-2\text{V}$ 에서  $-10\text{dB}$  이상의 소광비 특성을 갖고, 출력광의 출력을 높이기 위해  $-3\text{dB}$ 이내의 기초흡수를 갖는 구체적인 성능지표를 만족할 수 있는 초고속 광흡수 변조기용 양자우물 구조를 설계하였다. 이의 결과  $N_W=7$ ,  $t_w=100\text{\AA}$ ,  $\Delta\lambda=40\text{nm}$ ,  $t_n=800\text{\AA}$ 의 구조에서 변조기에서  $-1\text{V}$ 에서  $-2.92\text{dB}$  및  $-2\text{V}$ 에서  $-10.0\text{dB}$ 의 소광비 특성, 동시에 기초흡수  $-1.428\text{dB}$ 의 값이 예측되어 당초 설계 목표치를 도달할 수 있는 광흡수변조기 설계가 가능함을 알 수 있었다.

### 감사의 글

이 논문은 2000년 한양대학교 교내연구비 지원으로 연구 되었음.

### 참고문헌

- [1] T. Yamanaka, K. Wakita, and K. Yokoyama, "Potential chirp-free characteristics (negative chirp parameter) in electroabsorption modulator using a wide tensile-strained quantum well structure," *J. Appl. Phys. Lett.*, vol. 68, no. 22, pp. 3114-3116, 1996.
- [2] K. Morito, R. Sahara, K. Sato, and Y. Kotaki, "Penalty-free 10 Gb/s NRZ transmission over 100 km of standard fiber at  $1.55\mu\text{m}$  with a blue chirp modulator integrated DFB laser," *IEEE Photon. Tech. Lett.*, vol. 8, pp. 431-433, 1996.
- [3] F. Koyama and K. Iga, "Frequency chirping in external modulators," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 6, pp. 87-93, 1988.
- [4] K. Sato, I. Kotaka, K. Wakita, Y. Kondo, and M. Yamamoto, "Strained-InGaAsP MQW electroabsorption modulator integrated DFB laser," *Electron. Lett.*, vol. 29, no. 12, pp. 1087-1088, 1993.
- [5] K. Wakita, K. Sato, I. Kotaka, M. Yamamoto, and T. Kataoka, "20 Gbit/s,  $1.55\mu\text{m}$  strained-InGaAsP MQW modulator integrated DFB laser module," *Electron. Lett.*, vol. 30, no. 4, pp. 302-303, 1994.
- [6] T. Kataoka, Y. Miyamoto, K. Hagimoto, K. Sate, I. Kotaka, and K. Wakita, "20 Gb/s transmission experiments using an integrated MQW modulator/DFB laser module," *Electron. Lett.*, vol. 30, pp. 872-873, 1994.
- [7] T. H. Wood, C. A. Burrus, D.A.B. Miller, D. S. Chemla, T. C. Damen, A. C. Gossard, and W. Wiegmann, "High-speed optical modulator with GaAs/GaAlAs quantum wells in a p-I-n diode structure," *J. Appl. Phys. Lett.*, vol. 44, pp.16-18, 1984.
- [8] T. K. Woodward, L. M. F. Chirovsky, A. L. Lehtine, L. A. D'Asaro, E. J. Laskowski, M. Focht, G. Guth, S. S. Pei, F. Ren, G. J. Przylek, L. E. Smith, R. E. Leibenguth, M. T. Asom, R. F. Kopf, J. M. Kuo, and M. D. Feuer, "Operation of a fully integrated GaAs-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As FET-SEED: A basic optically addressed integrated circuit," *IEEE Photon. Tech. Lett.*, vol. 4, pp. 614-617, 1992.
- [9] A. M. Fox, D. A. B. Miller, G. Livescu, J. E. Cunningham, and W. Y. Jan, "Quantum well carrier sweep out: relation to electroabsorption and extinction saturation," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 27, no. 100, pp. 2281-2293, 1991
- [10] M. Ishizaka, M. Yamaguchi, J. Shimizu, and K. Komatsu, "The Transmission capability of a 10-Gb/s electroabsorption modulator integrated DFB laser using the offset bias chirp reduction technique," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 9, no. 12, pp. 1628-1630, 1997.
- [11] L. Buydens, P. Demeester, Z. Yu, and P. Van Daele, "High contrast/low voltage normally-on InGaAs/AlGaAs asymmetric Fabry-Perot modulator," *IEEE Photon. Tech. Lett.*, vol. 3, pp. 1104-1106, 1991.
- [12] O. Mitomi, I. Kotaka, K. Wakita, S. Nojima, K. kawano, Y. Kawamura, and H. Asai, "40 Ghz bandwidth InGaAs/InAlAs MQW optical intensity modulator," *Appl. Opt.*, vol. 31, no. 12, pp. 2030-2035, 1992.
- [13] T. Ido, S. Tanaka, M. Suzuki, and H. Inoue, "MQW electroabsorption optical modulator for 40Gb/s modulation," *Electron. Lett.*, vol. 31, pp. 2124-2125, 1995.
- [14] T. Ido, S. Tanaka, M. Suzuki, M. Koizumi, H. Sano, and H. Inoue, "Ultra-high-speed multiple-quantum-well electro-absorption optical modulators with integrated waveguides," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 14, no. 9, pp. 2026-2034, 1996.
- [15] H. Takeuchi, K. Tsuzuki, K. Sato, M. Yamamoto, Y. Itaya, A. Sano, M. Yoneyama, and T. Otsuji, "Very high-speed light-source module up to 40 Gb/s containing an MQW electroabsorption modulator integrated with a DFB laser," *IEEE J. of selected topics in Quantum Electron.*, vol. 3, no. 4, pp. 336-343, 1997.
- [16] K. H. Chung and J. I. Shim, "A new polarization-insensitive  $1.55\mu\text{m}$  InGaAs(P)-InGaAsP multiquantum-well electroabsorption modulator using a strain-compensating layer," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 35, no. 5, pp. 730-736, 1999.

## Structural dependences of the extinction ratio in an 1.55 $\mu\text{m}$ InGaAsP/InGaAsP multiple-quantum-well electro-absorption modulator

Youngseon Min, Jongin Shim<sup>†</sup>, and Yungseon Eo

*School of Electrical Engineering & Computer Science, Hanyang University, Kyungki-do 425-791, KOREA*

<sup>†</sup>*E-mail: jishim@giga.hanyang.ac.kr*

Donghoon Jang

*Optoelectronic Division, Samsung Electronics Co. Ltd., Suwon 440-600, KOREA*

(Received July 28, 2000 ; Revised manuscript received December 27, 2000)

The structural dependence of the performance of an 1.55  $\mu\text{m}$  InGaAsP/InGaAsP MQW electro-absorption modulator for high-speed digital fiber communication was systematically investigated. The effects of n-doped SCH region length  $t_n$  as well as the general structure parameters including quantum well number  $N_w$ , well-thickness  $t_w$ , detuning wavelength  $\Delta\lambda$ , and device length  $L$  were thoroughly analyzed. Thereby, a high-performance electro-absorption modulator with device length  $L$  of 100  $\mu\text{m}$  was successfully designed. The designed structure showed excellent characteristics that have residual loss less than -1.5 dB, operational voltage from 0 V to -2 V, and extinction ratios of -2.92 dB at  $V_a = -1$  V and -10 dB at  $V_a = -2$  V.

*Keywords* : OE.020, OE.050.