

論文2000-37SD-9-3

# 1.55 $\mu$ m InGaAsP/InGaAsP 다중양자우물구조 전계흡수형 광변조기에서 캐리어 수송현상이 소광특성에 미치는 영향

## (Dependence of Extinction Ratio on the Carrier Transport in 1.55 $\mu$ m InGaAsP/InGaAsP Multiple-Quantum-Well Electroabsorption Modulators)

沈 鍾 寅\*, 魚 瀛 善\*  
(Jongin Shim and Yungseon Eo)

### 요 약

1.55 $\mu$  m InGaAsP/InGaAsP 다중양자우물구조 전계흡수형 광변조기에서 캐리어 수송현상과 입력광 세기가 소광특성에 미치는 영향을 조사하였다. 포와송 방정식과 전자 및 정공의 전류 연속방정식, 광분포들을 양자우물에서의 전계강도에 따른 흡수계수들을 고려하여 self-consistent하게 해석하였다. 이중접합계면에서의 캐리어의 축적 및 광도파로영역에서의 공간전하에 의한 전계차폐 현상은 입사광 파워가 증가할 수록 입사단 영역에서 심하게 나타남을 알 수 있었다. 캐리어의 전계차폐에 의한 소광비 저감은 변조기가 길이가 200 $\mu$ m 정도로 긴 경우에는 입사광 파워가 약 10mW 이상에 대해서 심하게 나타날 수 있음을 알 수 있었다. 이러한 캐리어의 전계차폐에 따른 소광비 특성열화는 특히 입사광 파워가 클 수 있는 1.55 $\mu$ m DFB-LD와 전계흡수형 광변조기 집적소자나 광변조기 길이가 수십  $\mu$ m로 짧은 초고속 광흡수변조기의 경우에 더욱 심하게 나타날 수 있음을 지적하였다.

### Abstract

The effects of carrier transport and input power on the extinction ratio was theoretically analyzed in a 1.55 $\mu$  m InGaAsP/InGaAsP multiple-quantum-well(MQW) electroabsorption(EA) modulator. Poisson's equation, current continuity equations for electrons and holes, and optical field distribution were self-consistently solved by considering electric field dependent absorption coefficients. The field screening effect due to the carrier accumulation in heterointerface and the space-charge region occurred more seriously at the input side of modulator as input optical intensity increased. It was revealed that extinction ratio could be steeply degraded for modulator with the length of 200 $\mu$ m when an input power exceeds 10mW. A degradation of extinction ratio due to the field screening effect would be more significantly at high-performance devices such as a 1.55 $\mu$ m DFB-LD/EA-modulator integrated source where optical coupling efficiency is almost complete or a very high-speed modulator with its length as short as a few tens  $\mu$ m.

\* 正會員, 漢陽大學校 電子컴퓨터工學部

(School of Electrical & Computer Science, Hanyang University)

※ 본 연구과제는 한국과학재단 '96특정기초연구 96-1012-07-01-3 연구비 지원에 수행된 것임.

接受日字:1999年 11月22日, 수정완료일:2000年 8月25日

### I. 서론

반도체 레이저의 직접변조방식을 이용한 초고속 광통신시스템의 경우, 반도체 레이저의 직접변조 시 발생하는 동적파장천이(chirp) 현상으로 인해 전송특성에 많은 제약이 생긴다. 전계 인가시 발생하는 광흡수

혹은 굴절률 변화를 이용한 광변조기는 chirp 특성이 우수하기 때문에 최근 들어 그 사용이 급격히 늘어가고 있다. 이 가운데 InGaAsP/InGaAsP 다중양자우물(MQW)구조의 전계광학효과인 QCSE(Quantum Confined Stark Effect)를 이용한 반도체 광흡수 변조기는 소형, 낮은 구동전압, 높은 소광비, 고속동작 등이 가능하기 때문에 활발히 연구되고 있다<sup>[1]-[3]</sup>. 또한, 단일과장 반도체 레이저등과 집적화 함으로써 외부환경 변화에 대해 안정화된 동작특성을 얻을 수 있으며 두 소자간 광결합손실을 대폭 줄일 수 있어 고출력 동작이 기대된다<sup>[4]</sup>.

전계흡수(electroabsorption) 광변조기(optical modulator)의 경우 입력광 파워가 증가함에 따라 소광특성이 나빠지는 현상이 있다<sup>[5]-[8]</sup>. 이러한 소광특성의 입력광 의존성은 (1) 흡수층 영역에 존재하는 이종접합에 축적된 캐리어(특히 정공)와 (2) 양자우물 및 SCH영역에 존재하는 공간 캐리어에 의한 전계차폐(field screening)효과에 의한 것으로 생각되어 지고 있다. 이러한 이종접합계면의 캐리어 축적 및 공간전하에 의한 전계차단효과는 AlGaAs/GaAs계 보다도 InGaAsP/InGaAsP 계 광흡수 변조기에서 크게 나타나는데, 이는 가전자대의 밴드 offset이 커서 유효질량이 큰 정공이 광도파로 영역을 잘 통과하지 때문이다. 이러한 hole pile-up 현상을 줄이기 위해서 벌크의 활성층을 이용한 광흡수 변조기에서는 이종접합에서 발생하는 캐리어 축적(pile-up)의 효과를 줄이기 위해서 이종접합사이에 step이나 graded 밴드갭을 갖는 buffer층을 삽입하는 방법등이 제안되었다<sup>[8],[9]</sup>. 최근 선택 MOCVD(Metal-Organic Chemical Vapor Deposition) 결정성장 기술등의 진보에 따라 InGaAsP/InGaAsP MQW를 사용한 광흡수 변조기는 단일소자로서 뿐만 아니라 단일과장 DFB(distributed feedback)-LD(laser diode)와의 집적소자도 그리 어렵지 않게 제작 가능케 되었다. 이러한 DFB-LD/광흡수 변조기 집적된 소자인 DFB-LD와 광흡수 변조기 사이의 광결합 효율이 거의 완벽에 가깝기 때문에 광흡수 변조기애로의 입사광 파워가 충분히 클 수 있어 상기의 전계 차폐효과에 의한 소광비 특성의 저감이 염려된다. 그러나 아직 이종접합계면이 많이 존재하는 InGaAsP/InGaAsP계 MQW의 QCSE효과를 이용한 전계흡수형 광변조기에서 이러한 전계차단효과를 고려한 소광특성의 입력광 의존성에 대해서는 구체적으로

보고된 바가 없다.

본 논문에서는 1.55 μm InGaAsP/InGaAsP MQW 구조를 갖는 전계흡수형 광변조기에서 2차원광분포해석, QCSE 효과, 확산 및 drift에 의한 캐리어 수송현상, 전계세기에 따른 흡수계수변화를 self-consistent하게 해석하였다. 이로 부터 MQW 광변조기에서 입력광 파워 및 캐리어 수송현상이 소광특성에 미치는 영향을 체계적으로 조사하였다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2절에서는 MQW 광흡수 변조기에서 carrier 수송특성 해석 모델을 설명하였으며, 제3절에서는 해석결과 및 검토, 제4절에서는 본 논문에서 얻어진 결과를 정리하였다.

## II. MQW 광흡수 변조기에서의 캐리어 수송 모델

그림 1에 본 연구에서 해석한 전계흡수형 광변조기의 에너지 밴드 다이어그램을 나타내었다. 본 연구에서는 입사광의 진행방향(z축)에 따라 양자우물에 수직인 방향(x축)으로의 포텐셜 분포와 캐리어 분포를 self-consistent하게 해석하였다. 해석에 사용한 방정식들은 다음과 같다<sup>[8]</sup>.

Poisson's equation

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla \Psi) = q(n - p - N_d^+ + N_a^-) \quad (1)$$

Current continuity equations

$$\nabla \cdot J_n = -q(G_n - R_n - e_n) \quad \text{for electrons} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot J_p = q(G_p - R_p - e_p) \quad \text{for holes} \quad (3)$$

Current density equations

$$J_n = -q\mu_n n (\nabla \Psi + \nabla \theta_n) + qD_n \nabla n \quad \text{for electrons} \quad (4)$$

$$J_p = -q\mu_p p (\nabla \Psi + \nabla \theta_p) - qD_p \nabla p \quad \text{for holes} \quad (5)$$

여기서  $\Psi$ 는 전위,  $\epsilon$ 은 유전상수,  $q$ 는 전자의 전하량이다. 여기서  $n$ 과  $p$ 는 각각 전자와 정공농도이며,  $N_d^+$ 와  $N_a^-$ 는 각각 이온화 된 도너와 억셉터의 도핑 농도이다.  $J_i$ 는 캐리어의 표류와 확산에 의한 전류밀도,  $G_i$ 는 캐리어 생성률,  $R_i$ 은 캐리어의 재결합률,  $e_i$ 는 이종접합계면에서의 캐리어의 방출률,  $\mu_i$  이동도,  $\theta_i$  밴드 파라미터,  $D_i$  확산계수이며, 첨자  $i = n, p$ 는 각각 전자와 정공을 나타낸다.

캐리어의 생성을  $G_n$  과  $G_p$  는 역바이어스 전압이 인 가된 광변조기 흡수층에서의 여기자 및 연속체 상태간의 흡수로 인한 전자와 정공이 생성되는 항을 나타내며, 입사광 파워  $P_{in}(z)$  와 식(6) 같은 관계가 있다.

$$G_n = G_p = \frac{\alpha(F(z))}{h\nu} P(z) \quad (6)$$

여기서,  $h\nu$ 는 입사광 에너지,  $\alpha(F(x, z))$ 는 전력흡수 계수로  $(x, z)$ 로 지정되는 흡수영역에서의 전계강도  $F$ 의 함수이다.

캐리어 재결합을  $R_n$  과  $R_p$  는 캐리어의 재결합로 Shockley-Read-Hall 재결합을  $R_{SRH}$ , Auger 재결합  $R_{Aug}$ , 자연방출에 의한 재결합을  $R_{sp}$ 의 합으로 된다 고 가정하였으며, 각각은 식(8)~식(9)로 표현된다<sup>[10]</sup>.

$$R_n = R_p = R_{SRH} + R_{Aug} + R_{sp} \quad (7)$$

$$R_{SRH} = \frac{np - n_i^2}{\tau_p(n + n_i) + \tau_n(p + n_i)} \quad (8)$$

$$R_{Aug} = (C_n + C_p p)(np - n_i^2) \quad (9)$$

$$R_{sp} = B(np - n_i^2) \quad (10)$$

$n_0$  와  $p_0$  는 각각 열 평형상태의 전자 및 정공농도,  $n_i$ 는 intrinsic 캐리어 농도,  $\tau_n(\tau_p)$ 는 소수캐리어수명,  $C_n(C_p)$ 는 Auger계수,  $B$ 는 자연방출광계수를 나타낸다. 본 해석에서는  $\tau_n = \tau_p = 10\text{ns}$ ,  $C_n = C_p = 3.0 \times 10^{-29} \text{cm}^6/\text{s}$ ,  $B = 1.2 \times 10^{10} \text{cm}^3/\text{s}$ 를 사용하였다.

양자우물내에서 발생된 캐리어의 전위장벽으로의 방출은 thermionic emission과 tunneling 과정을 통하여 일어날 수 있다. 전자(정공)의 방출률  $e_n(e_p)$ 은 식(11)과 같이 표현 가능하다.

$$e_i = \frac{N}{\tau_{ei}} \quad (11)$$

$$\frac{1}{\tau_{ei}} = \frac{1}{(\tau_E)} + \frac{1}{(\tau_T)} \quad (12)$$

식(11)과 식(12)에서 첨자  $i = n(\text{or } p)$ 로서 전자와 정공을 나타낸다.  $\tau_{Ei}$ 와  $\tau_{Ti}$ 는 각각 thermionic emission time 및 tunneling time을 나타내며, 양자우물구조의 밴드 파라미터들을 사용하여 식(13)과 식(14)로 근사할 수 있다<sup>[5]</sup>.

$$\frac{1}{\tau_{Ei}} = \sqrt{\frac{kT}{2m_i^* L_w^2}} \exp\left(-\frac{H_{ei}(F)}{kT}\right) \quad (13)$$

$$H_{ei}(F) = \Delta E_{c,y} - E_i^{(n)} - |e|FL_w/2 \quad (14)$$

$$\frac{1}{\tau_{Ti}} = \frac{nh\pi}{2m_i^* L_w^2} \exp\left(-\frac{2L_w \sqrt{2m_i^* H_{Ti}(F)}}{h}\right) \quad (15)$$

$$H_{Ti}(F) = \Delta E_{c,y} - E_i^{(n)} - |e|F(L_w + L_b)/2 \quad (16)$$

식(13)~식(16)에서  $m_i^*$ 는 양자우물에서 전자(정공)의 유효질량,  $m_{bi}^*$ 는 전위장벽에서 전자(정공)의 유효질량,  $L_w$ 는 우물 두께,  $L_b$ 는 전위장벽 두께를 나타낸다.  $\Delta E_c(\Delta E_v)$ 는 무바이어스시 전도대(가전자대)의 양자우물과 전위장벽사이의 band-offset이다.  $E_i^{(n)}$ 는 Schrödinger 방정식의 해석된 양자우물내에서의 전자의  $n$ 차 부밴드 에너지 값이다.  $\Delta E_c = 140.9[\text{meV}]$ ,  $\Delta E_v = 50.2[\text{meV}]$ 를 해석 시 사용하였다.

전계흡수 변조기에서 소광비(E.R.)는 전계인가시와 무인가시의 출력단( $z=L$ )에서의 광파위의 비로서 정의된다.

$$\text{E.R.} = -10 \log \left[ \frac{P(V, z=L)}{P(0, z=L)} \right] \quad (18)$$

상기의 모델을 이용하여 InGaAsP/InGaAsP MQW 전계흡수형 광변조기의 소광특성에 캐리어의 전송특성이 미치는 영향을 조사하여 보았다. 먼저 소자구조, 물질 조성, 도핑량, 물질파라미터등을 입력파라미터, 입력 광파워등을 설정한다. 양자우물영역에서의 캐리어, 전위등을 정확히 해석하기 위하여, 불균일한 mesh를 사용한 1차원 FDM(Finite-Difference Method)을 이용하였다. 주어진 축방향으로 임의의 점  $z_0$ 에서, 양자우물 구조에 수직인 방향( $x$ 축)으로 Poisson 전류연속방정식을 self-consistent하게 해석하였다.  $z = z_0 \sim z_0 + \Delta z$  영역에서는 전계분포, 캐리어 분포, 흡수계수등이 일정하다고 가정한 후,  $z = z_0 + \Delta z$ 에서의 광파워를 계산하였다. 이러한 과정을 입사단에서 출사단 까지 반복하여 계산하였다. 본 해석에서는  $\Delta z$ 는  $10 \mu\text{m}$ 라 가정하였다. 입사단에서 주어진 광파워  $P(V, z=0)$ 와 해석을 통해 얻어진 출사단에서의 광파워  $P(V, z=L)$ 를 식(18)에 대입함으로써 소광비를 계산하였다. 다음절에는 이의 해석결과에 대해서 논의하기로 한다.

### III. 결과 및 검토

해석에 사용한  $1.55 \mu\text{m}$  InGaAsP/InGaAsP MQW

전계흡수형 광변조기의 에너지 밴드 다이어그램을 그림 1에 나타내었다. 양자우물에는 bulk의 밴드갭 파장이 1.61  $\mu\text{m}$ , 두께 8nm, 압축응력이 1%인 InGaAsP층으로 되어 있다. 전위장벽으로는 bulk의 밴드갭 파장 1.24  $\mu\text{m}$ , 두께 5nm, 인장응력 1.5%인 InGaAsP를 사용하여 strain-compensating 구조로 되어 있다. 이 경우 양자화 에너지 파장은 1.48  $\mu\text{m}$  로, 1.55  $\mu\text{m}$  입력광 파장에 대해 -70nm detuning되어 있다. 양자우물수는 7개로 가정하였다. SCH(Separated Confinement Heterostructure)영역은 전위장벽과 같은 1.24  $\mu\text{m}$  밴드갭파장의 InP기판에 격자정합을 이룬 InGaAsP층이다. 광구속계수는 10%로 최대가 되도록 SCH두께를 67nm로 설정하였다. SCH영역, 전위장벽, 양자우물 영역의 도핑은 n형이고 농도는 모두  $n=1.0 \times 10^{15} [\text{cm}^{-3}]$ 라 하였다. p-InP와 n-InP의 clad층 도핑농도는  $5 \times 10^{17} [\text{cm}^{-3}]$ 이라 하였다. 광변조기 길이는 200  $\mu\text{m}$ , 단면의 반사율은 zero, 입력광은 TE편파의 1.55  $\mu\text{m}$ 파장을 갖는다고 가정하였다.

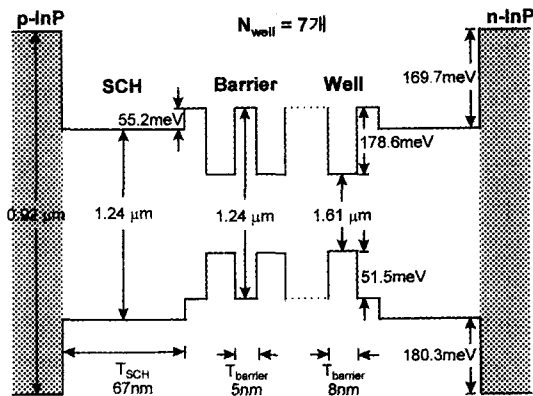


그림 1. 해석에 사용된 1.55  $\mu\text{m}$  광흡수 변조기의 InGaAsP/InGaAsP MQW 에너지밴드 구조  
 Fig. 1. Schematic band diagram of 1.55  $\mu\text{m}$  InGaAsP/InGaAsP MQW electroabsorption modulator.

그림 2는 그림 1에 주어진 광변조기의 MQW구조에 대해 QCSE를 해석하여 얻은 입력광 파장에 따른 흡수스펙트럼이다. 여기자(exciton) 및 연속체 상태간의 흡수피크를 동시에 고려하여 FDM방법으로 해석한 결과이다<sup>[11],[12]</sup>. 여기자의 broadening 효과로서는 phonon scattering, well thickness fluctuation, background doping 등이 고려되었다. 그림 2에서 흡수단에서 나타나는 가장 큰 흡수피크는 1st heavy-

hole과 1st-conduction electron에 의한 여기자 흡수에 의한 것으로, 전계 인가에 따라 흡수피크 값이 줄어드는 것을 알 수 있다. 이는 전계에 의한 전자와 정공의 파동함수의 공간적 분리가 Coulomb 상호작용을 감소시켜 여기자의 결합에너지가 감소함에 의한 것이다. 그림 3은 그림 2에서 입력광 파장이 1.55  $\mu\text{m}$ 일 때 전계에 따른 흡수계수를 나타낸 것이다. 전계강도가 약130kV/cm이상에서 다시 흡수계수가 줄어드는 것은 exciton 피크 파장이 입사광 파장1.55  $\mu\text{m}$  보다 장파장으로 이동하기 때문이다.

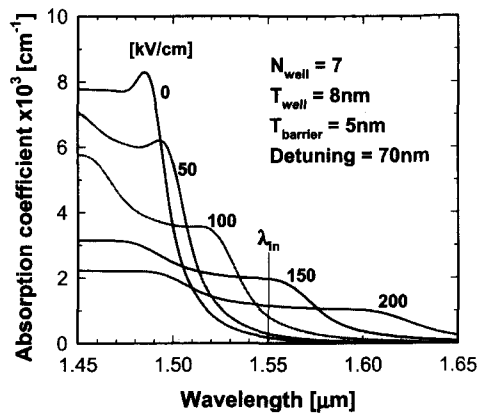


그림 2. 그림 1의 에너지 밴드구조의 InGaAsP/InGaAsP 양자우물에서의 인가전계에 따른 흡수스펙트럼의 변화

Fig. 2. Absorption spectra for the different electric field intensities across a InGaAsP/InGaAsP MQW modulator shown in Fig.1.

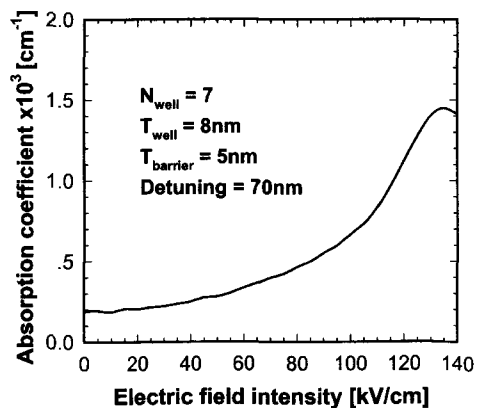


그림 3. 입사파장 1.55  $\mu\text{m}$ 인 경우 양자우물영역에서 전계강도에 따른 흡수계수변화

Fig. 3. Dependence of absorption coefficient as a function of electric field intensity at the input light wavelength of 1.55  $\mu\text{m}$ .

그림 4와 그림 5에 입력광 파워가 10mW와 100mW의 두 경우에 대해, 입사단(즉, z=0)에서 전계분포 및 정공분포를 나타내었다. p-InP/u-InGaAsP SCH 혹은 n-InP/u-InGaAsP SCH 이종접합계면에는 InP와 1.24m InGaAsP와의 밴드갭 에너지 차이가 커서 큰 전위spike가 나타난다. 특히 p-InP/ u-InGaAsP SCH 이종접합계면에서는 n-InP/u-InGaAsP SCH 이종접합계면 에서 보다는 많은 정공들이 축적되게 된다. 이는 가전자대의 band offset이 전도대 보다 크고, 정공의 유효질량이 전도대의 전자의 유효질량보다 크

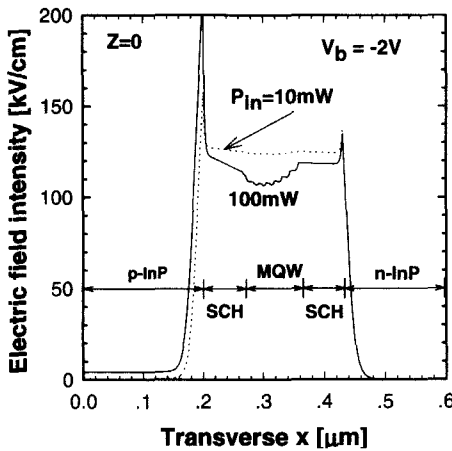


그림 4. 입력광 파워가 10mW와 100mW인 경우, 입사단에서의 MQW-SCH영역의 전계분포

Fig. 4. Electric field distributions at the device input end for input powers of 10mW and 100mW.

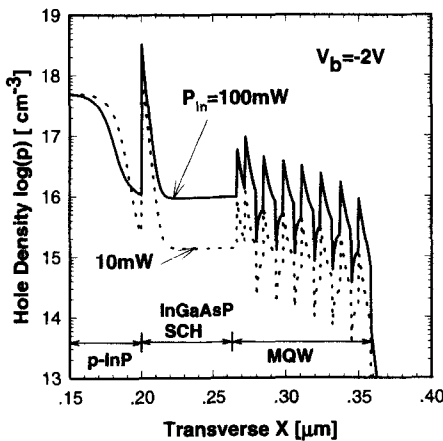


그림 5. 입력광 파워가 10mW와 100mW인 경우, 입사단에서의 MQW-SCH영역의 정공분포

Fig. 5. Hole distributions at the device input end for input powers of 10mW and 100mW.

기 때문이다. 따라서 p-InP/u-InGaAsP SCH 이종접합계면에서 축적된 정공들이 주로 양자우물영역의 전계차단효과를 많은 영향을 주게 된다. 정공축적에 의한 전계차폐효과의 감소를 위해서는 p-InP/u-SCH 이종접합계면에서 정공의 흐름이 좋도록 하는 것이 중요함을 알 수 있다. 입사광 파워가 증가함에 따라서는 따라서 p(n)-InP/u-InGaAsP SCH 이종접합계면에서 뿐만아니라 MQW 전영역에 걸쳐 정공(전자)농도가 증가하게 됨을 알 수 있는데, 이러한 space-charge양의 증가는 양자우물 영역의 전계강도를 약화시켜서 결과적으로 흡수계수와 소광특성을 열화하게 되는 원인이 된다.

그림 6과 그림 7에 해석으로 부터 얻어진 종방향(z축)와 횡방향(x축)에 대한 전계강도 및 정공농도 분포의 일례를 나타내었다. 변조기에의 인가전압 Vb을 -2[Volt]로 균일하게 가한 상태에서, 20mW의 파워를 갖는 TE편파의 1.55 μm파장의 입력광을 입사한 경우이다. 입사단 영역의 정공 수는 출사단에서보다 크게 나타나고, 양자우물에 가해지는 실제적인 인가전계의 세기는 입사단 보다 출사단에서 크게 나타남을 알 수 있다. 입사단 근처에서는 큰 입사광 세기에 많은 정공과 전자가 발생하고, 이로 인해 입사단 영역에서는 이종접합계면에서 많은 정공들이 축적되어 양자우물에 실제로 가해지는 인가전계를 크게 차단하기 때문이다. 이러한 전계차단효과는 결국 흡수계수의 감소를 초래해 더욱 소광특성을 나쁘게 하는 원인이 된다.

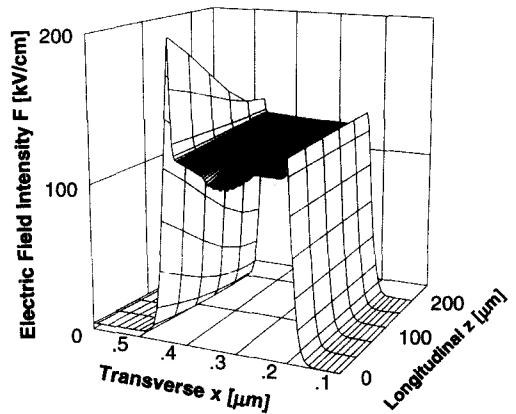


그림 6. 광변조기 인가전압 Vb=-2volt, 입사광 파워가 20mW인 경우의 2차원 전계분포

Fig. 6. 2-dimensional electric field distribution with an applied voltage of 2volt and an input power of 20mW.

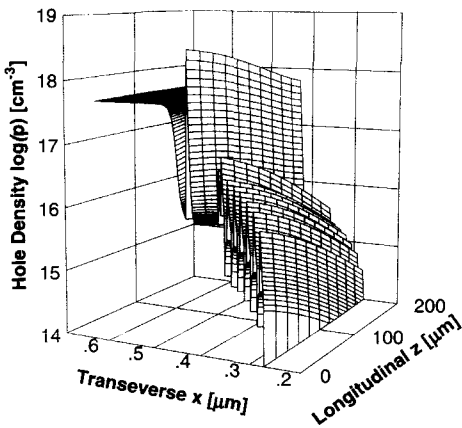


그림 7. 광변조기 인가전압  $V_b = -2$ volt, 입사광 파워가 20mW인 경우의 2차원 정공분포

Fig. 7. 2-dimensional hole distribution with an applied voltage of 2volt and an input power of 20mW.

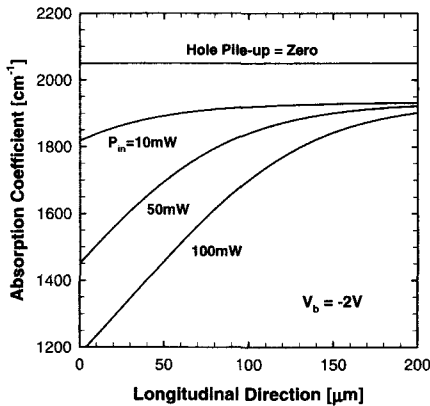


그림 8. 입력광 파워에 따른 종방향으로의 흡수계수 변화  
Fig. 8. Absorption coefficient along the longitudinal distribution with for different input powers.

그림 8에  $V_b = -2$ [Volt]로 일정한 경우 종방향에 따른 양자우물영역에서의 흡수계수 변화를 나타내었다. 그림에서 점선으로 나타낸 값은 캐리어 수송현상에 의한 전계차단 효과를 무시한 경우, 즉 SCH를 포함한 u-doped영역에 균일하게 전계가 가해진다고 가정한 경우이다. 이 경우는 캐리어 전송특성을 고려한 실선의 그래프에 비하여 흡수계수를 크게 나타남을 알 수 있다. 그림에서 hole pile-up현상에 의한 흡수계수 감소는 주로 입사단에서부터 수십  $\mu$ m 이내에서 발생함을 알 수 있다. 최근 들어 광통신 정보용량의 증가에 따라 광변조기의 변조속도가 40Gb/s 이상이 연

구되고 있다<sup>[1]</sup>. 이러한 초고속 광변조기인 경우에는 소자의 RC 시정수를 줄이기 위해서 소자길이를 수십  $\mu$ m 정도로 매우 작게 할 필요가 있는데, 이 경우는 특히 캐리어 수송특성을 고려하지 않으면 예측되는 소광특성을 과대 평가할 수 있으므로 주의하여야 함을 알 수 있다.

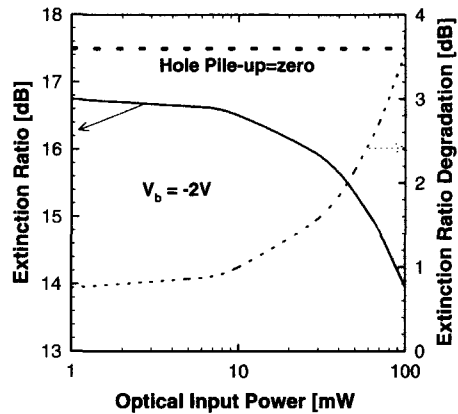


그림 9. 입력광 파워에 따른 소광비의 의존성  
Fig. 9. Dependence of extinction ratio as a function of input powers.

그림 9에 변조기길이 200  $\mu$ m 소광비의 입력광세기 의존성을 나타내었다. 동일 전압 인가시 입사광 파워가 10mW이하인 경우에는 약 1[dB]정도인데 반해, 입력광파워가 10mW이상이면 전계차단효과에 의한 소광특성 갑자기 나빠짐을 알 수 있다. 그러나 소광특성의 입력광 의존성은 기초흡수량이 커지거나 광변조기 길이가 수십  $\mu$ m 정도로 짧아지게 되면 더욱 심하게 나타날 수 있다. 따라서 광변조기의 결정성장 상태가 불량하거나 입사광 파장과 여기자 흡수파크 파장차이 (detuning양)이 적은 경우 및 초고속 광변조기 제작 시에는 캐리어 수송현상을 고려한 광흡수변조기 설계가 더욱 중요하게 됨을 알 수 있다. 이상의 결과는 광변조기를 DC로 동작시킬 경우를 대상으로 하였다. 그러나 광변조기를 디지털로 초고속으로 변조시킬 경우에는 MQW 구조에서의 carrier의 수송시간에 의해 내부의 carrier 분포가 변화하게 되어 소광특성도 DC 동작의 경우에 비해 달라질 것으로 예상된다. 고속변조시의 소광특성의 열화가 주로 양자우물구조에서의 carrier의 pile-up에 의해 발생된다고 하고 그림 1의 구조에 대해 식(13) 및 식(15)로부터 carrier escape time을 해석하여 보았다. 이의 결과 carrier

escape time에 의한 제한은 정공의 escape time  $\tau_p$ 에 의해 발생되고,  $\tau_p$ 는 정공의 thermionic emission time  $\tau_{ep}$ 에 의해 지배받음을 알 수 있었다.  $\tau_p$  값은 인가전압양에 따라 다소 변하나 약 100ps 정도로 예측되었다. 이러한 고찰로 부터 상기의 정적특성 해석 결과는 변조신호의 rising- 혹은 fall-time이 100ps 보다 긴 경우에 대해서는 적용 가능하다고 할 수 있겠다.

## V. 결 론

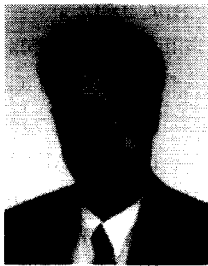
이종접합계면이 다수 존재하는 1.55  $\mu\text{m}$  InGaAsP/InGaAsP MQW전계흡수형 광변조기에서 캐리어 수송현상이 소광비에 미치는 영향을 조사하였다. 캐리어 수송현상은 포외송 방정식, 전류 연속방정식, 광분포, 양자우물에서의 전계강도에 따른 흡수계수들을 self-consistent하게 해석함으로써 얻어졌다. MQW광흡수 변조기에서 캐리어(특히 정공)의 축적은 p-InP/u-InGaAsP SCH층의 이종접합계면에서 발생되기 때문에, 이곳에서의 정공의 흐름을 좋게하는 것이 중요함을 지적하였다. 이종접합계면에서의 캐리어의 축적 및 MQW영역에서의 공간전하에 의한 전계차폐 현상은 입사단 영역에서 심하게 나타남을 알 수 있었다. 본 연구에서 대상으로 한 구조와 같이 광변조기 길이가 200  $\mu\text{m}$ 로 충분히 긴 경우에는 hole pile-up현상에 의한 소광비 열화는, 입력광 세기가 약10mW이하에 대해서는 1[dB]정도, 10mW이상인 경우에는 급격히 나빠짐을 알 수 있었다. 광변조기 길이가 수십  $\mu\text{m}$  정도로 짧은 40Gb/s급 초고속 단일 광흡수변조기 혹은 입사광 세기가 매우 커지는 DFB-LD와의 집적 소자에서는 hole pile-up현상이 소광비 특성에 매우 크게 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- [1] 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, Sep. 1996.
- [2] F. Devaux, S. Chelles, A. Ougazzaden, A. Mircea, M. Carre, F. Huet, A. Carencu, Y. Sorel, J. F. Kerdiles, and M. Henry, "Full polarization insensitivity of a 20Gb/s strained-MQW electroabsorption modulator," *IEEE Photonics Technol. Letters.*, vol.6, no. 10, pp. 1203~1205, 1994.
- [3] R. M. Lammert, D. V. Forbes, G. M. Smith, M. L. Osowski, and J. J. Coleman, "InGaAs-GaAs Quantum-Well lasers with monolithically integrated intracavity electro-absorption modulators bt selective-area MOCVD," *IEEE Photonics Technol. Letters.*, vol. 8, no. 1, pp. 78~80, 1996.
- [4] H.Takeuchi, K.Tsuzuki, K.Sato, M.Yamamoto, Y. Itaya, A. Sano, M. Yoneyama, and T. Otsuji, " Very high-speed light-source up to 40Gb/s containing an MQW electro-absorption modulator integrated with a DFB laser," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 3, no. 2, pp. 336~343, Apr. 1997.
- [5] M. E. Watson, J. L. A. Chilla, J. J. Rocca, J.-W. Kim, D. L.Lile, T. J. Vogt, and G. Y. Robinson, "Saturation intensity and time response of InGaAs-InGaP MQW optical modulators," *IEEE J. Quantum. Electron.*, vol.31, no.2, pp. 254260, 1995
- [6] A. M. Fox, D. A. B. Miller, G. Livescu, J. E. Cunningham, and W. Y. Jan, "Quantum well carrier sweep out: relation to electro-absorption and exciton saturation," *IEEE J. Quantum. Electron.*, vol.27, no.10, pp. 2281~2295, 1991.
- [7] T. Ikeda and H. Hiroshi, "Analysis of the attenuation ratio of MQW optical intensity modulator for 1.55  $\mu\text{m}$  wavelength taking account of electron wave function leakage," *IEEE J. Quantum. Electron.*, vol.32, no.2, pp. 284~292, 1995.
- [8] D. Meglio, P. Lugli, R. Sabella, and O. Sahlen, "Analysis and optimization of InGaAsP electro-absorption modulators," *IEEE J. Quantum. Electron.*, vol.31, no.4, pp. 169~177, 1995.
- [9] M. Suzuki, H. Tanaka, and S. Akiba,

- "Effect of hole pile-up at heterointerface on modulation voltage in InGaAsP electro-absorption modulators," *Electron. Lett.*, vol. 25, no. 2, pp. 88~89, 1988.
- [10] C. Glingener, D. Schulz, and E. Voges, "Modeling of optical waveguide modulators on III-V semiconductors," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol.31, no.1, pp.101~112, 1995.
- [11] P. J. Stevens, M. Whitehead, G. Parry, and K. Woodbridge, "Computer modeling of the electric field dependent absorption spectrum of multiple quantum well material," *IEEE J. Quantum. Electron.*, vol.24, no.10, pp. 2007~2016, 1988.
- [12] K.H.Chung and J.I.Shim, "A new polarization insensitive 1.55 $\mu$ 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.

저 자 소 개



沈鍾寅(正會員)

1960年 12月 2日生. 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 한국전자통신연구소 연구원. 1994年 4月 1994年 2月 일본전기(NEC) 쓰쿠바 연구소 연구원. 1994年 3月 현재 한양대학교 전자컴퓨터 공학부 부교수. 주관심 분야 광통신용 광소자 및 RF packaging

魚瀛善 (正會員) 電子工學會誌 第33卷 第10號 1996. 10 參照