

論文2000-37SD-9-4

InGaAs/InAlAs 다중 양자우물을 이용한 표면 반사형 전광 스위치의 해석

(Analysis of Surface Reflection All-Optical Switches using InGaAs/InAlAs Multiple Quantum Wells)

崔容豪*, 金庚煥*, 崔佑榮*

(Yong-Ho Choi, Kyung-Whan Kim, and Woo-Young Choi)

요 약

본 논문에서는 InGaAs/InAlAs 다중 양자우물을 이용한 두가지 타입의 비대칭 Fabry-Perot 전광 스위치에 대한 해석을 시도하였다. 전광 스위치의 동작을 해석하기 위해서 먼저 양자우물의 광 흡수계수와 굴절률의 변화 특성을 계산하였다. 양자우물의 비선형성 해석 결과를 토대로 전광 스위치의 ON/OFF 비와 스위칭 속도를 비교하였다. 시뮬레이션 결과로부터, DBR을 이용한 구조의 전광 스위치는 DBR이 없는 형태의 전광 스위치보다 ON/OFF 비를 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라 스위칭 시간도 단축시킬 수 있음을 알 수 있었다.

Abstract

The performance of two types of surface reflecting all-optical switches with InGaAs/InAlAs multiple quantum wells are investigated. The absorption spectra and the refractive index changes of the quantum well are calculated for various pump and probe beam intensities and device conditions. From these results, the ON/OFF ratio and switching speed of the two switches are compared. It is shown that the switch using DBR has higher ON/OFF ratio and higher switching speed than the switch without DBR.

I. 서 론

광 스위칭 소자는 광 신호를 이용하는 여러 분야에서 광범위하게 사용된다. 특히 반도체를 이용한 광 스위칭 소자는 집적화가 용이하고 효율적인 스위칭이 가능함으로 많은 연구가 이루어져 왔다. 최근 광통신 시스템이 급속히 발전함에 따라 이러한 시스템에서 요구하는 초고속 스위칭을 위한 소자에 대한 연구가 점차 활발해지고 있다.

초고속 스위칭 소자를 구현하기 위한 방법으로, 광 신호만을 이용해서 동작하는 전광(all-optical) 스위치가 있다. 전광 스위치는 전기 신호를 이용할 경우 발생하는 스위칭 속도 한계를 극복할 수 있으므로 많은 관심의 대상이다. 반도체를 이용한 초고속 전광 스위치에 관한 연구는 광학적 비선형성 향상에 관한 연구와 스위치의 동작 효율을 높이기 위한 구조 제안이라는 두 가지 방향으로 전개되고 있다. 반도체 내에서의 비선형성의 향상을 위한 방법에는 intersubband optical transition^[1], 저온 성장된 GaAs^[2], InGaAs/InAlAs^[3]를 이용할 수 있으며, 1.5 μ m 대역에서 pico 초 이하의 캐리어 lifetime을 갖는 재료에 대한 실험결과가 발표된 바 있다^[3]. 스위치의 구조는 Mach-Zehnder^[4], waveguide^[5], directional coupler^[6], Fabry-Perot^[7-9] 등, 다양한 형태가 사용될 수 있다. 특히, 최근에는 Fabry-Perot 스위치의 상단부에 낮은 반사율을 갖는

* 正會員, 延世大學校 電氣電子工學科

(Dept. of Electrical and Electronic Eng., Yonsei University)

※ 본 연구는 중점국가 과제 차세대 포토닉스 기술 개발 사업에 의하여 지원되었습니다.

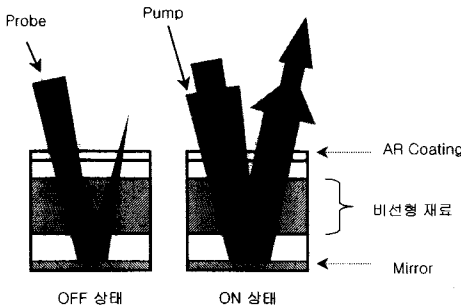
接受日字:1999年 3月15日, 수정완료일:2000年 8月25日

Distributed Bragg Reflector(DBR)을 첨가한 구조의 비대칭 Fabry-Perot 전광 스위치가 보고되어 관심의 대상이 되었다^{[7],[9]}.

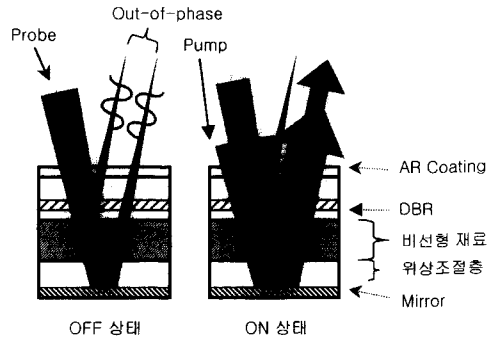
본 논문은 이제까지 실험적인 결과만 발표된 바 있는 두 가지 유형의 Fabry-Perot 전광 스위치에 대해서 시뮬레이션을 통한 비교 분석에 중점을 두었다. 전광 스위치를 구성하기 위한 반도체 재료는 광통신 시스템이 요구하는 파장대에서 사용될 수 있는 InGaAs/InAlAs 다중 양자우물을 이용하였다. 전광 스위치의 ON/OFF 출력 특성을 해석하기 위해 양자우물의 광학적 비선형성을 해석하였으며, 이 결과를 토대로 두 가지 타입의 전광 스위치에 대해서 ON/OFF 비와 스위칭 시간의 관점에서 비교 분석했다.

II. 비대칭 Fabry-Perot 전광 스위치의 동작원리 및 구조

그림 1에는 본 연구의 대상인 두 가지 타입의 전광 스위치 구조가 나타나 있다. 전광 스위치의 구조는 기본적으로, AR-coating 층, 비선형 재료 층, 그리고 mirror로 구성되어 있다. AR-coating 층은 표면에서의 반사로 인한 손실을 막기 위한 층이다. 비선형 재료 층은 스위칭 동작에 필요한 광학적 비선형 현상이 발생하는 부분으로, 본 연구에서는 InGaAs/InAlAs 양자우물이 사용되었다. 입사된 신호를 반사시키기 위한 mirror는 Au mirror 또는 DBR이 사용될 수 있다. 굴절률은 quantum well 재료의 구성비를 근거로 계산되었으며, 위상조절 층의 두께는 재료에 따라 위상이 180도가 되도록 하는 두께를 계산하였다. DBR은 [9]와 같은 조건으로 100%의 반사율을 갖는 이상적인 경우로 가정하였다.



(a) Type I



(b) Type II

그림 1. 전광스위치의 기본 구조

Fig. 1. Structure of all-optical switches.

Type I의 스위치는 양자우물의 흡수 계수 변화를 이용해서 동작하는 형태의 전광 스위치이다^[10]. 그림 1(a)에서와 같이 스위치가 OFF 상태일 때, 스위치에 입사된 probe 신호는 비선형 재료 층에서 흡수되므로 출력 신호는 0에 가까운 상태가 된다. 스위치가 ON 상태인 경우, pump 신호는 양자우물의 흡수계수를 포화시키므로 probe 신호의 대부분은 흡수되지 않고 mirror에서 반사되어 출력된다. 이와 같은 구조의 전광 스위치는 probe 신호가 다중 양자우물 층을 두 번 통과하기 때문에 스위칭 효율이 좋다. 또한, 스위치 구조상 병렬 신호 처리를 할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나 비선형 재료의 흡수계수 변화를 이용한 스위칭 동작은 광학적 비선형성이 매우 큰 반도체 재료를 필요로 한다. 비선형 재료 층의 두께가 얇거나 흡수 계수가 작을 경우, OFF 상태일 때 입력된 probe 신호는 모두 흡수되지 않고 일부가 출력된다. 따라서 스위치의 ON/OFF 비는 낮아진다. OFF 상태에서의 출력신호 크기를 감소시키기 위해 비선형 층의 두께를 증가시키는 경우, ON 상태에서의 출력신호 흡수량도 증가한다. 따라서 스위치의 내부 손실이 커지는 문제점이 발생한다. 따라서 그림1(a)과 같은 구조에서는 스위치 내부 손실을 줄이면서 동시에 높은 ON/OFF 비를 갖는 전광 스위치를 구현하는데 어려움이 있다.

Type I과 같은 구조의 전광 스위치의 단점을 해결시키고자 스위치의 상단에 낮은 반사율을 갖는 DBR을 첨가한 새로운 형태의 전광 스위치가 제안되었다^[9]. 그림 1(b)는 이와 같은 전광 스위치의 기본 구조를 나타내고 있다. 스위치가 OFF 상태일 경우, 스위치에

입사된 probe 신호의 일부는 DBR에서 반사되며 나머지 신호는 비선형 재료 층에서 흡수되고 이 중 일부가 mirror에서 반사되어 출력된다. DBR에서 반사된 신호와 mirror에서 반사된 신호간의 위상이 out-of-phase 관계가 되도록 위상 조절 층의 두께를 정해주면 스위치의 OFF 상태 출력신호는 0에 가까워진다. 스위치가 ON 상태인 경우, pump 신호는 비선형 재료층의 흡수계수를 포화시키게 된다. 따라서 mirror에서 반사되어 출력되는 probe 신호는 비선형 재료층에서 흡수되지 않으므로, 낮은 반사율을 갖는 DBR에서 반사된 신호보다 더욱 크게 된다. 따라서 DBR에서 반사된 probe 신호는 스위치의 ON 상태에는 큰 영향을 주지 못한다. 더욱이, pump 신호에 의한 양자우물의 흡수계수 변화는 굴절을 변화를 발생시키므로 OFF 상태에의 out-of-phase 관계는 변화하게 된다. 이러한 구조의 전광 스위치는 Type I 전광 스위치에 비해 높은 ON/OFF 비를 얻을 수 있을 뿐 아니라 스위칭 시간도 감소시킬 수 있다.

III. 양자우물의 광학적 비선형성

본 논문에서는 전광 스위치를 구성하기 위한 반도체 비선형 재료로 In_{0.53}Ga_{0.47}As/In_{0.52}Al_{0.48}As 양자우물을 사용했다. 양자우물과 우물장벽의 두께는 각각, 80Å, 100Å으로 설정했다. 전광 스위치에 입력된 pump 신호는 스위치 내의 양자우물에서 흡수되어 양자우물의 흡수 계수를 포화시킨다. 이러한 광 흡수현상은 여러 가지가 있으나 이 중에서 가장 두드러진 현상은 band-to-band 흡수현상과 exciton 흡수현상이다. 양자우물의 흡수계수를 계산하는 데 있어서 이 두 가지 현상만을 고려했다.

Band-to-band 흡수계수를 계산하기 위한 결과 식은 다음과 같이 정리될 수 있다^[11].

$$\alpha(\hbar\omega) = C_0 \sum_{ij} I_{hj}^{eij2} \int_0^\infty dE \rho_r^{2D} |\hat{e} \cdot p_{cv}|^2 \times F(E_g + E_{hj} + E_{ei} + E - \hbar\omega) [f_c^i(E) - f_v^j(E)] \quad (1)$$

이때, F(x)는 Lorentzian 함수이며, C₀는 식(2)와 같은 계수이다.

$$C_0 = \frac{\pi e^2}{ncsm_0^2\omega} \quad (2)$$

여기서, ρ_r^{2D} 는 2-D의 reduced density of state이다. I_{hj}^{eij} 는 j번째 가전자대와 i번째 전도대에서의 포락선 함수의 적분값으로 식(3)과 같으며, i, j = 2 까지 고려했다.

$$I_{hj}^{eij} = \int_{-\infty}^\infty dz \psi_i(z) g_j(z) \quad (3)$$

f_c^i 와 f_v^j 는 각각 전도대와 가전자대에서의 Quasi-Fermi 준위를 나타낸다. 또한 $|\hat{e} \cdot p_{cv}|^2$ 는 momentum matrix element를 나타내며 m_r은 reduced effective mass를 의미한다.

전자와 홀의 Coulomb interaction에 의해서 발생하는 exciton 흡수는 다음과 같은 식으로 정리될 수 있다^[11].

$$\alpha(\hbar\omega) = \frac{16C_0}{\pi L_z a_0^2} \sum_x I_{hj}^{eij2} |\hat{e} \cdot p_{cv}|^2 \frac{\gamma/\pi}{(E_x - \hbar\omega)^2 + \gamma^2} \quad (4)$$

이때, L_z는 우물두께이며, a₀는 식(5)와 같은 계수이다.

$$a_0 = \frac{4\pi\epsilon\hbar^2}{m_r e^2} \quad (5)$$

Exciton의 흡수 에너지 준위 E_x는 E_{hj}^{ei}와 E_{ex}의 합으로 구성되어 있다. Exciton binding 에너지 E_{ex}는 1s, 2s, 3s,... 과 continuum binding 에너지 향으로 구성되어 있다. 그러나 1s state 에너지 준위에서의 흡수계수가 가장 크므로 이 때의 흡수계수만을 고려하였다.

그림 2는 pump에 의해 양자우물 내에 주입된 캐리어의 농도에 따른 흡수 계수의 변화를 나타낸다. 흡수 계수 α는 exciton 흡수 계수와 band-to-band 흡수 계수의 합으로써 계산했다. 그림 2에서 볼 수 있듯이, pump에 의해 주입된 캐리어가 없을 때에는 흡수계수 그래프에서 두 개의 peak가 나타남을 알 수 있다. 낮은 에너지 peak는 heavy hole에 의한 흡수를 나타내고 높은 에너지 peak는 light hole에 의한 흡수를 나타낸다. 흡수계수는 양자우물 내에서의 캐리어의 농도가 증가함에 따라 감소한다. 캐리어의 농도에 따른 exciton 흡수 계수의 변화는 식 (6)을 이용하였다^[12]

$$\alpha_{ex}(N) = \frac{\alpha_{ex}(\hbar\omega)}{1 + N/N_s} \quad (6)$$

N_s는 포화 상태에 이르는 캐리어의 농도를 나타낸다.

그림 2의 결과와 같이, 흡수계수 변화는 약 0.8eV에서 가장 크게 나타났다.

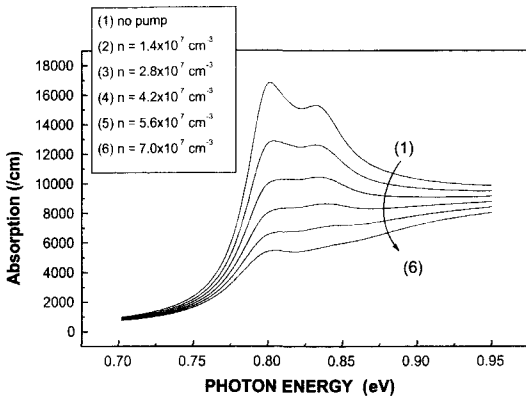


그림 2. 주입된 캐리어 농도에 따른 양자우물의 흡수 계수의 변화

Fig. 2. Quantum well absorption spectra with various injected carrier densities.

흡수 계수의 변화는 굴절률의 변화를 일으킨다. 이러한 굴절률 변화는 식(6)의 Kramers-Kronig 관계식^[13]을 이용해서 계산하였다. 식(7)에서 Pr은 principal value 적분을 의미한다. 적분구간은 0.7eV에서 0.95eV까지로 설정했다.

$$\Delta n(\hbar w) = \frac{\hbar c}{\pi} \cdot \text{Pr} \int \frac{\Delta \alpha(\hbar w')}{(\hbar w')^2 - (\hbar w)^2} \cdot d(\hbar w') \quad (7)$$

그림 3은 흡수계수의 변화에 따른 굴절률 변화를 계산한 결과이다. 그림 3에서, 굴절률 변화가 최대인

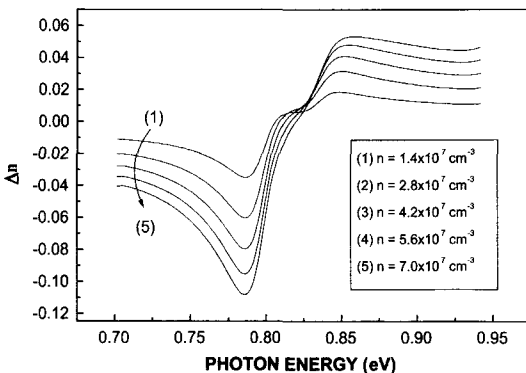


그림 3. 캐리어 농도에 따른 굴절률 변화 스펙트럼
Fig. 3. Refractive index change spectra for various injected carrier densities.

영역과 그림 2에서, 흡수 계수 변화가 최대인 영역은 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 위와 같은 양자우물의 비선형성 해석에 쓰인 주요 파라미터 값은 표 1과 같다.

표 1. 흡수계수에 사용된 주요 파라미터 값
Table 1. Parameters used for calculating absorption spectra.

주요 파라미터 값	
양자우물 두께 L_z	80 Å
캐리어 Lifetime τ	1.5ns
굴절률 $n(\text{InGaAs})$	3.5
유효질량 $m_e(\text{InGaAs})$	0.041 m_0
유효질량 $m_{hh}(\text{InGaAs})$	0.377 m_0
유효질량 $m_{lh}(\text{InGaAs})$	0.052 m_0
유효질량 $m_e(\text{InAlAs})$	0.071 m_0
유효질량 $m_{hh}(\text{InAlAs})$	0.58 m_0
유효질량 $m_{lh}(\text{InAlAs})$	0.14 m_0
$\Delta E_c(\text{InGaAs/InAlAs})$	0.429eV
$\Delta E_v(\text{InGaAs/InAlAs})$	0.286eV
$E_g(\text{InGaAs})$	0.741eV
$E_g(\text{InAlAs})$	1.456eV
포화 캐리어 밀도 N_s	$7 \times 10^{17}/\text{cm}^3$

전광 스위치에 입사되는 신호는 펄스 형태이다. 따라서, 양자우물 내에서의 시간에 따른 흡수 계수 변화를 계산하기 위해서는 먼저, pump 펄스 신호에 따른 양자우물 내의 캐리어 농도를 계산해야 한다. Pump 신호에 의해서, 양자우물 내에서 발생하는 캐리어 농도의 시간 변화 $N(t)$ 는 식(8)의 비율 방정식을 만족시키며, 이로부터 식(9)를 구할 수 있다^[13].

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{\alpha(\omega)I(t)}{\hbar \omega} - \frac{N(t)}{\tau} \quad (8)$$

$$N(t) = \frac{e^{-t/\tau} \alpha(\omega) I_0}{\hbar \omega} \int_{-x}^t e^{t'/\tau} \exp[-(\frac{2\sqrt{\ln 2}}{\beta} t')^2] dt' \quad (9)$$

여기서, t 는 pump-probe 간의 지연 시간을 나타내며, $I(t)$ 는 pump intensity를 의미한다. τ 는 양자우물 내에서의 캐리어 lifetime을 의미하며 1.5ns로 정했다^[14]. Pump/probe 신호는 gaussian 형태를 가정했으며, 펄스의 FWHM을 나타내는 β 는 그림 6의

경우를 제외하고는 0.2ns로 가정했다. x는 펄스 형태 인 pump의 적분 구간을 정의하기 위한 변수로서, pump 신호의 FWHM의 2배 값으로 정했다.

위 식을 계산한 결과, pump/probe 지연 시간이 약 0.2ns 일 때 캐리어의 농도가 최대가 되었다. 따라서 이러한 조건일 때의 스위치 출력을 ON 상태일 때로 정의했다. 스위치를 동작시키기 위한 pump와 probe의 에너지 준위는 흡수 계수의 변화가 가장 큰 영역인 0.8eV로 설정했다. ON 상태일 때의 pump intensity는 약 30kW/cm^2 으로 가정했으며, 이 때의 캐리어 농도는 약 $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 였다.

IV. 전광 스위치의 출력 특성 비교

InGaAs/InAlAs 양자우물의 광학적 특성 해석 결과를 토대로 Type I과 Type II 전광 스위치의 동작 특성을 비교 분석하였다. 식(9)에 의한 캐리어 농도의 변화 계산 결과를 토대로 시간에 따른 흡수 계수의 변화를 계산하였다. 스위치의 출력은 이러한 흡수계수의 변화를 이용해서 계산했다.

그림 4는 Type I 전광 스위치에서 양자우물의 수에 따른 ON 상태의 출력 크기와 ON/OFF 비를 계산한 결과이다. 그림에서와 같이 스위치가 ON 상태일 때의 출력 신호 크기는 양자우물의 수가 증가할수록 감소했다. 이것은 probe를 흡수하는 비선형 층의 증가에 기인한 것이다. 반면에 양자우물의 수가 증가하면, OFF 상태에서의 출력 신호 크기도 감소한다. 따라서 ON/OFF 비는 양자우물의 수가 증가할수록 증가했다.

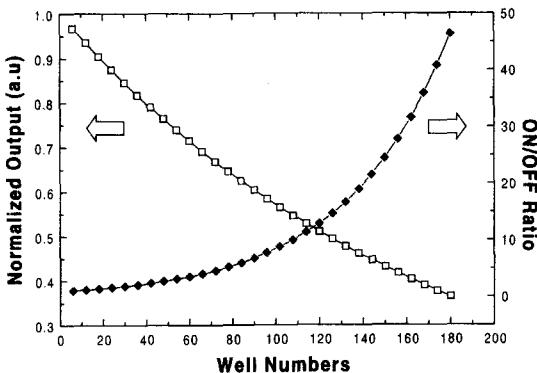


그림 4. 양자우물 수에 따른 스위치 출력과 ON/OFF 비의 변화

Fig. 4. Switch output and ON/OFF ratio as a function of the quantum well number.

즉, 이러한 두 가지 요소는 서로 상충되는 관계에 있는 문제점이 있다. 스위치의 동작을 최적화하기 위해서는 높은 ON/OFF 비를 사짐과 동시에 스위치의 내부 손실을 최소화해야 한다. 같은 조건에서 Type I과 Type II 전광 스위치의 출력 특성을 비교하기 위해 두 전광 스위치 내의 양자우물의 수를 130개로 고정시켰다. 이때, Type II 전광 스위치에서 OFF 상태 출력 신호를 최소화하기 위해 요구되는 DBR의 반사율은 약 3%였으며, 위상 조절층의 두께는 약 230nm였다.

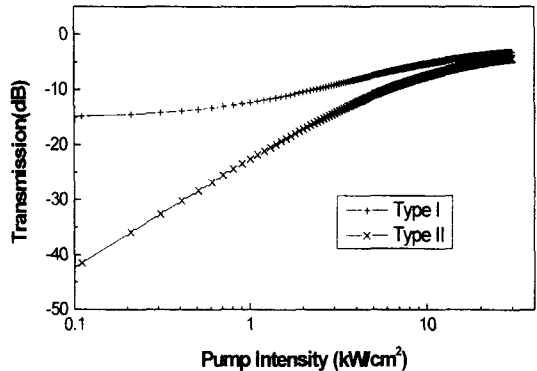


그림 5. Pump intensity에 따른 전광 스위치의 출력 변화

Fig. 5. Switch transmission as a function of the pump intensity.

Pump의 증가에 따른 두 전광 스위치의 출력 신호 크기를 비교한 결과는 그림 5와 같다. Type I 전광 스위치의 OFF 상태 출력 신호 크기는 약 -15dB였으나, DBR을 이용한 Type II 전광 스위치에서의 OFF 상태 출력은 약 -42dB 정도로 매우 작았다. Type II 전광 스위치의 경우에도 OFF 상태 출력 신호 크기는 정확히 0이 되지는 않았다. 그 이유는 DBR에서 반사되는 신호와 mirror에서 반사되는 신호간의 시간차와, pump 펄스의 진행에 따른 흡수 계수의 변화에 기인한다. Type I 스위치에서의 ON/OFF 비가 약 11dB 인 반면, Type II 전광 스위치에서의 ON/OFF 비는 약 40dB 정도로써 ON/OFF 비가 현저하게 증가함을 알 수 있었다. 그림 6은 pump/probe 신호의 펄스 폭 감소에 따른 ON/OFF 비의 변화를 나타낸다. 그림에서, 볼 수 있듯이 펄스의 폭이 작아질수록 ON/OFF 비는 감소한다. 이는 mirror에서 반사된 신호와 DBR에서 반사된 신호의 시간차에 의한 오차가 펄스폭이 작아질수록 점점 큰 영향을 미치기 때문이다. 그림 6의 결과는 [9]에 제시된 실험결과(FWHM= 0.7ps)와

유사한 형태를 보인다.

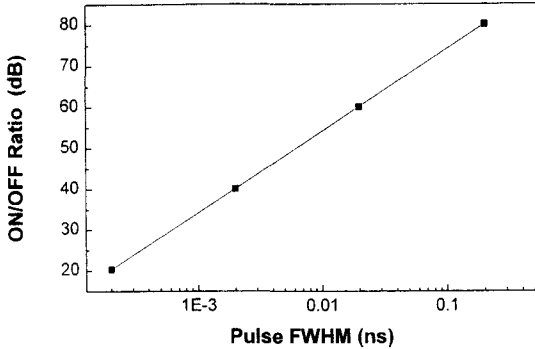


그림 6. Probe 펄스 폭에 따른 전광 스위치의 ON/OFF 비

Fig. 6. ON/OFF ratio as a function of the probe pulse width.

그림 7은 pump-probe 지연시간에 따른 두 전광 스위치의 출력 신호 크기를 계산한 결과이다. 그림에서, 지연시간이 0 이하 일 때부터 출력이 증가함을 볼 수 있는데 이것은 지연시간이 pump/probe 펄스의 중심축 간의 시간차를 의미하기 때문이다. Type I 전광 스위치에서는 출력 신호가 최대 값의 1/2이 되기까지 약 1.2ns 정도 소요되었다. 그러나 Type II 전광 스위치의 경우 0.9ns 정도로, 약 25% 정도 단축되었다. 이것은 Type I 전광 스위치에서의 ON/OFF 동작이 pump 신호에 의한 흡수계수 변화만을 이용해서 이루진 데 반해서, DBR을 이용한 Type II 전광 스위치에서의 ON/OFF 동작은 흡수계수 뿐 아니라 굴절률 변화까지 이용하기 때문이다. 따라서 DBR을 이용한 Type II 구조는 더욱 빠른 스위칭 속도를 얻을 수 있다.

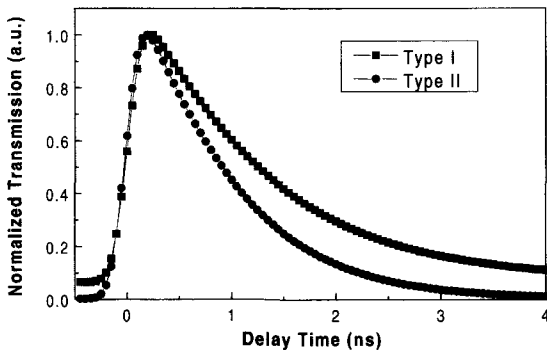


그림 7. Pump-probe 지연시간에 따른 전광 스위치의 출력 변화

Fig. 7. Switching characteristics as a function of pump-probe delay time.

Type II 전광 스위치의 경우, 스위치의 OFF 상태 출력 크기가 최소가 되도록 하기 위해서는 OFF 상태에서 DBR에서 반사되는 신호와 mirror에서 반사되는 신호간의 위상이 정확하게 out-of-phase 관계를 가지도록 조절해야 한다. 그림 8은 위상 조절층의 두께의 변화에 따른 Type II 전광 스위치의 OFF 상태 출력을 계산한 것이다. 그림 8과 같이 스위치의 OFF 상태 출력은 위상 조절층의 두께에 따라 사인 곡선 형태로 변화했다. Type II 전광 스위치를 효율적으로 동작시키기 위해서는 위상 조절층의 두께를 정확하게 조절하는 것이 매우 중요한 요소임을 알 수 있었다.

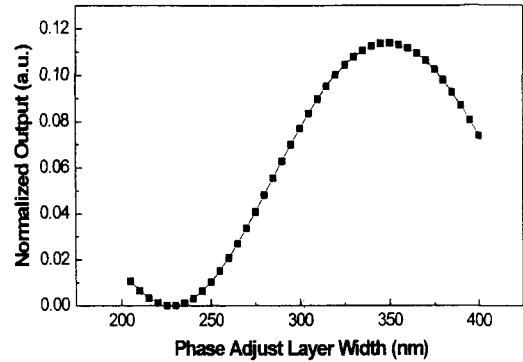


그림 8. 위상 조절 층의 두께에 따른 스위치 OFF 상태 출력 크기

Fig. 8. Normalized transmission of the switch at OFF state as a function of the width of phase adjust layer.

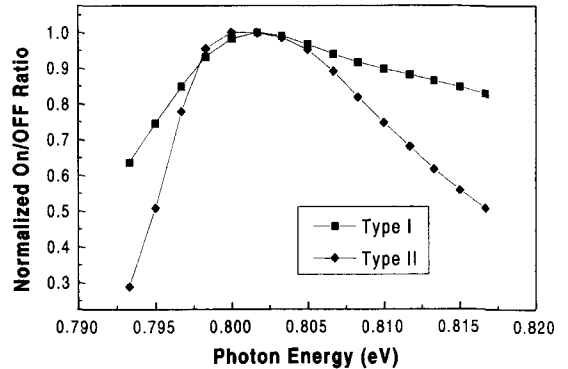


그림 9. Probe 에너지 준위 변화에 따른 전광 스위치의 ON/OFF 비

Fig. 9. ON/OFF switching ratio as a function of probe energy.

Probe 에너지 대역 변화에 따른 두 전광 스위치의 ON/OFF 비의 변화를 계산하여 비교했으며, 그 결과

는 그림 9와 같다. 그림에서도 알 수 있듯이 Type II 구조의 전광 스위치는 Type I 구조의 스위치에 비해 좁은 대역폭을 가짐을 알 수 있다. 이것은 probe의 에너지 대역이 변화함에 따라 흡수계수 뿐만 아니라 mirror와 DBR에서 반사되는 probe 신호의 위상 관계도 변화하기 때문이다.

V. 결 론

본 논문에서는 InGaAs/InAlAs 다중 양자우물의 비선형성을 이용해서 구현된 두가지 형태의 Fabry-Perot 전광 스위치의 스위치의 출력 특성을 비교 분석하였다. 이러한 해석을 위해서 InGaAs/InAlAs 다중 양자우물의 흡수계수와 굴절률 변화를 계산하였다. 양자우물의 비선형성 해석 결과를 바탕으로, 두 구조의 전광 스위치의 ON/OFF 비와 스위칭 시간에 대해서 비교 분석하였다. Type II 전광 스위치는 DBR 층을 첨가하여 높은 ON/OFF비와, 감소된 스위칭 시간을 얻을 수 있었다. 다만, 이러한 성능 향상을 얻기 위해서는 위상 조절층의 두께와 동작 파장이 정확히 조정되어야 했다. 본 연구의 결과는 반도체를 이용한 초고속 전광 스위치의 구현에 많은 도움을 줄 수 있으리라 예상된다.

참 고 문 헌

- [1] K.J. Kuhn, G.U. Iyengar and S. Yee, "Free carrier induced changes in the absorption and refractive index for intersubband optical transition in AlGaAs/GaAs/AlGaAs quantum wells," J. Appl. Phys. vol. 70 p. 5010, 1991.
- [2] H.S. Loka, S.D. Benjamin and P.W.E. Smith, "Optical characterization of low-temperature-grown GaAs for ultrafast all-optical switching devices," IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-34, p. 1426, 1998.
- [3] R. Takahashi, Y. Kawamura, T. Kagawa and H. Iwamura, "Ultrafast 1.55um photo-response in low temperature grown InGaAs/InAlAs quantum wells," Appl. Phys. Lett. vol. 65, p.1790, 1994.
- [4] S. Nakamura, K. Tajima and Y. Sugimoto, "Experimental investigation on high-speed switching characteristics of a novel symmetric Mach-Zehnder all-optical switch," Appl. Phys. Lett. vol. 65, p. 283, 1994.
- [5] P. Likamwa, J.E. Sitch, N.J. Mason, J.S. Roberts and P.N. Robson, "All optical multiple-quantum-well waveguide switch," Electron. Lett. vol. 21, p. 26, 1985.
- [6] P. Likamwa, A. Miller, J.S. Roberts and P.N. Robson, "130 ps recovery of all-optical switching in a GaAs multiquantum well directional coupler," Appl. Phys. Lett. vol. 58, p. 2055, 1991.
- [7] H.S. Loka and P.W.E. Smith, "Ultrafast all-optical switching in an asymmetric Fabry-Perot device using low-temperature grown GaAs," IEEE Photon Technol. Lett., vol. 10, p. 1733, 1998.
- [8] T. Akiyama, M. Tsuchiya and T. Kamiya, "Sub-pJ operation of broadened asymmetric Fabry-Perot all-optical gate with coupled cavity structure," Appl. Phys. Lett. vol. 72, p.1545, 1998.
- [9] R.Takahashi, Y.Kawamura and H.Iwamura, "Ultrafast 1.55um all-optical switching using low-temperature-grown multiple quantum wells," Appl. Phys. Lett. vol. 68, p.153, 1996.
- [10] W. Kowalsky, Th. Hackbarth and K.J. Ebeling, "Optically controlled GaAs/AlAs multiple quantum well modulators employing integrated dielectronic reflectors," Appl. Phys. Lett. vol. 52, p.1933, 1988.
- [11] S.L. Chuang, Physics of Optoelectronics Devices, John Wiley & Sons, Inc., ch. 9, p. 385, ch. 13, p. 564, 1995.
- [12] S.H. Park, J.F. Morhange, A.D. Jeffery, R.A. Morgan, A. Chavez-Pirson, H.M. Gibbs, S.W. Koch, N. Peyghambarian, M. Dertine, A.C. Gossard, J.H. English and W. Weigmann, "Measurements of room-

temperature band-gap-resonant optical nonlinearities of GaAs/AlGaAs Multiple quantum wells and bulk GaAs," Appl. Phys. Lett. vol. 52, p. 1201, 1988.

- [13] K.Nakamura, A.Shimizu, K.Fujii, M.Koshiba and K. Hayata, "Numerical analysis of the absorption and the refractive index change in arbitrary semiconductor quantum well structures," IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-28, p. 1670, 1992.

- [14] J.S. Weiner, D.B. Pearson, D.A.B. Miller and D.S. Chemla, "Nonlinear spectroscopy of InGaAs/InAlAs multiple quantum well structures," Appl. Phys. Lett. vol. 49, p. 531, 1986.

저 자 소 개

崔 容 豪(正會員)

1997년 2월 연세대학교 전자공학과 졸업(공학사).
1999년 동대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1999년
5월~현재 현대전자 메모리 연구소 근무. 주관심 분야
는 광통신용 반도체 소자, 반도체 메모리 특성 분석
등임

金 庚 煥(正會員) 第 36卷 D編 第 5號 參照

崔 佑 榮(正會員)

1988년 5월 Massachusetts Institute of Technology
의 EECS Department B.S. 및 M.S. 취득. 1994년 5
월 동대학원 Ph.D. 취득. 1994년 10월부터 1995년 8
월까지 일본 NTT 광전자 연구소 Post-Doctoral
Fellow. 1995년~2000년 8월 연세대학교 전자공학과
조교수, 2000년 9월~현재 연세대학교 전자공학과
부교수. 주관심분야는 초고속 시스템 설계 및 해석
과 이의 구현을 위한 소자 연구