반도체 전광(All-optical) 스위치에서의 On/Off 비 향상
(On/Off Ratio Improvement in Semiconductor All-Optical Switch)

최용호, 최우영
연세대학교 전자공학과

Abstract

We investigate the on/off ratio for an all-optical switch made of GaAs/AlGaAs multiple quantum wells and propose a new structure which improved on/off ratio. Absorption coefficients and refractive index changes are calculated for modeling switching devices. The simulation result showed that on/off ratio can be improved more than ten times with our new structure.

Ⅰ. 서론

전광(All-Optical) 스위치는 빛을 이용해서 빛을 제어하는 방식의 소자로써, 전기 스위칭 소자의 속도 한계를 극복하기 위한 한 방법으로써 오랫동안 연구되어 왔다. 특히, 최근에는 초고속 광통신 시스템을 위한 초고속 전광 스위칭 소자에 대한 연구가 활발해지고 있다[1]. 본 논문에서는 반도체로 이루어진 반사형 전광 스위치의 모델링을 시도하였으며 기존의 스위칭 소자[2,3,4]의 On/Off 비를 크게 향상시킬 수 있는 구조를 제안하였다. 또한 제안된 구조의 특성을 Simulation한 결과 기존의 구조보다 약 10배 이상의 on/off 비 향상을 얻을 수 있었다.

Ⅱ. 스위치 구조 및 동작원리

반사형 전광 스위치의 기본구조는 AR Coating 층, MQW 층, Au mirror로 구성되어 있다. 스위치의 동작은 Pump 신호로써 제어하는데, Pump 신호가 없는 경우에 신호가 입력되면 MQW 영역에서 입력신호가 흡수되어 출력신호는 나타나지 않게 된다. 그러나 Pump 신호가 입력되면 이 신호는 MQW 층에서 흡수계수의 포화현상을 일으키게 된다. 따라서 Pump 신호와 함께 입력된 Probe 신호는 흡수되지 않게 되므로 On 상태로써 출력된다.

그림 1은 이와 같은 전광 스위치의 동작원리

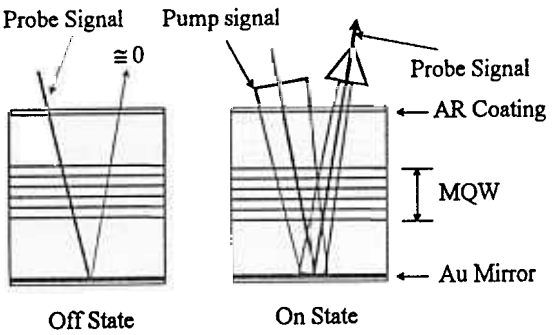

그림 1. 전광 스위치의 동작 원리

를 보여주고 있다.

Pump 신호가 없는 Off 상태일 때, 입력된 신호는 MQW에서 완전히 흡수되지 않고 출력되며 이는 On/Off 비를 감소시키는 주된 원인이 된다. Off 상태의 출력신호를 감소시키기 위해 MQW 층의 수를 증가시키면 되나 On 상태일 때의 출력신호도 감소하므로 비효율적인 방법이 된다.

본 연구에서는 On/Off 비를 증가시키기 위해 MQW 층의 상단부에 DBR Reflector를 설치하였다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 경우 DBR Reflector에서 반사된 신호와 출력신호가 Out of Phase 상태가 되도록 위상조절 층의 두께를 조절해주면 Off 출력신호가 0에 더욱 가까워진다. 뿐만 아니라 스위치가 On 상태일 때, Pump 신호는 MQW 층의 흡수계수 변화를

발생시켜 굴절율 변화를 유도한다. 따라서 이것은 DBR Reflector의 반사신호와 출력신호 사이의 Out of Phase 상태를 변화시킨다.

그림 2는 DBR Reflector가 스위치의 동작에서 어떻게 작용하는가를 보여주고 있다.

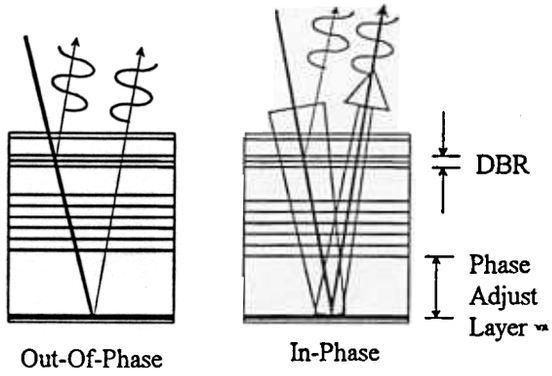

그림 2. DBR Reflector를 이용한 전광 스위치의 동작 원리

Ⅲ. 양자 우물의 광학적 특성 해석

전광 스위치 구현을 위한 양자 우물은 76Å의 우물 두께를 가지는 GaAs/AlGaAs MQW로 가정했다. MQW 층에서의 흡수 계수 계산은 흡수 현상이 중에서 가장 큰 영향을 미치는 양자 우물의 에너지 대역 간 흡수와 Excitonic 흡수만을 고려했다.

양자 우물 내에서의 에너지 대역간 흡수는 양자 우물에 존재하는 각각의 에너지 준위에서의 흡수 계수의 합으로 나타나며 식(1)과 같은 식으로 표현될 수 있다. [5]

$$\alpha_{band}(\hbar w) = C_0 \cdot \frac{m_r}{\pi \hbar L_z} \sum |I_h^e|^2 \cdot \int |e \cdot p_{cv}|^2 \cdot F(E+E_g+E_e+E_h-\hbar w) \cdot [f_c(E)-f_v(E)]dE \quad (1)$$

$$C_0 = \frac{\pi e^2}{nc\varepsilon m_0^2 \omega} \quad (2)$$

이때, F는 Lorentzian 함수로써 식 (3)과 같으며 Γ는 linewidth를 의미한다.

$$F(x) = \frac{\Gamma}{\pi(x^2+\Gamma^2)} \quad (3)$$

$|e \cdot p_{cv}|^2$ 는 Momentum Matrix Element를 의미하며 L_z는 양자우물의 폭을 나타낸다.

I_h^e는 전도대역과 가전도대역에서. Carrier의 포락선 함수의 적분값이다.

Excitonic 흡수계수는 2D 모델을 가정하였으며 1s Exciton 흡수만을 고려했다.

이 경우에 Excitonic 흡수 계수는 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\alpha_{ex}(\hbar w) = \frac{16 c_0}{\pi L_z a_0^2} \sum |I_h^e|^2 |e \cdot p_{cv}|^2 \cdot F(E_x - \hbar w) \quad (4)$$

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

Exciton의 흡수는 Carrier의 농도가 증가함에 따라 현저하게 감소하는데 Excitonic 흡수계수의 Carrier의 농도에 따른 변화는 식 (6)으로 계산하였다.

$$\alpha(N) = \frac{\alpha(\hbar w)}{1+N/N_s} \quad (6)$$

N_s는 포화상태에 이르는 Carrier의 농도를 나타낸다. 또한 Carrier의 농도 증가에 따른 Linewidth Broadening은 선형적인 식을 가진다고 가정하였다[6].

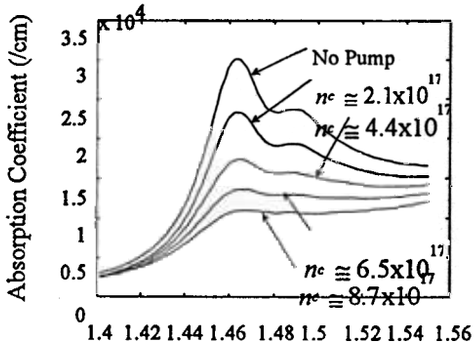

그림 3. Carrier 농도에 따른 Absorpton Coefficient 변화

그림 3은 Pump 신호에 의해 발생하는 Carrier의 농도에 따른 흡수 계수 변화의 계산 값를 보여주고 있다. 이 결과는 GaAs/AlGaAs MQW 모델에 대한 흡수 계수 측정 실험[7]과 비교해 볼 때 비교적 정확하다고 볼 수 있다.
흡수 계수 변화에 따른 굴절률 변화 계산은 식(7)과 같이 Kramers-Kronig 변환을 이용하여 계산하였다.

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

식(7)에서 Pr은 Principal Value 적분을 의미하며 계산 결과는 그림 4와 같다.

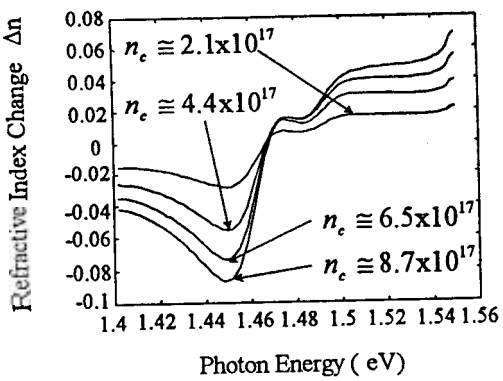

그림 4. Carrier 농도에 따른 굴절률 변화

Ⅳ. 스위치 모델링 결과

전광 스위치에 사용된 MQW층 수는 출력신호의 크기에 많은 영향을 끼친다. MQW층의 수가 증가하면 Off 상태 출력 특성은 좋아지나 On 상태 출력 특성이 나빠지며 MQW층의 수가 감소하면 반대의 결과가 나타난다. 또한 MQW층의 수가 증가할수록 out of Phase 상태가 많이 변화한다.

본 연구를 위한 스위치 모델에서는 MQW층의수를 약 60개로 하였으며 이것은 MQW층 수에 따른 출력 결과를 계산해서 비교적 우수한 출력 특성을 가지는 MQW층 수를 가지도록 한 것이다.

DBR이 없는 전광 스위치의 출력 특성을 계산했을 때 입력 신호의 에너지 준위가 약 1.464eV에서 가장 좋은 On/Off 비 특성을 나타냈으며 이때의 On/Off 비는 7:1이었다. 이러한 결과는 MQW 스위칭 소자 실험[1]의 결과 (On/Off 비 = 8:1)와 비슷한 결과이다.

스위치의 Off 상태 출력값은 약 0.05(a.u.)였으며 이러한 출력 신호를 제거하기 위해서 대략 5% 정도의 반사율을 갖는 DBR Reflector를 설치하였다. DBR Reflector가 없는 전광 스위치와 DBR Reflector가 있는 전광 스위치의 출력값 계산 결과는 그림 5와 같다.

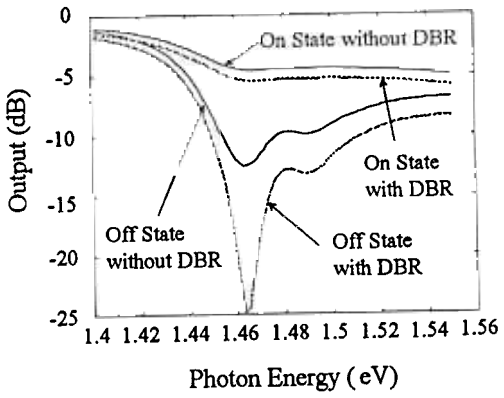

그림 5. 입력신호의 에너지 준위에 따른 전광 스위치의 출력값 비교

전광 스위치에 DBR Reflector를 설치했을 경우, 입력신호의 에너지 준위가 1.464eV에서의 On/Off 비가 7:1에서 약 78:1로 향상되었다. Modulation Depth로 계산했을 경우 약 0.98이 나왔다. 이것은 기존의 스위칭 소자 실험[3]에서의 Modulation Depth 0.15보다 매우 큰 값이다. 또한 Electrooptic 스위칭 소자에 관한 연구[4]에서 얻은 On/Off 비 20:1보다 우수한 결과이다.

Ⅴ. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 전광 스위치 구현을 위한 소자의 모델링을 시도해 보았으며 DBR Reflector

를 이용하여 출력신호의 On/Off 비를 크게 향상시킬 수 있는 구조를 제시하고 그 결과를 비교 분석하였다.

< 참고 문헌 >

[1] P.W. Juodawlkis, " Ultrafast carrier dynamics and optical nonlinearities of low temperature grown InGaAs/InAlAs multiple quantum wells," Appl. Phys. Lett. Vol. 69, p. 4062, 1996.

[2] G.D. Boyd et. al.,"Multiple quantum well reflection modulator," Appl. Phys. Lett. Vol. 50, p. 1119, 1987.

[3] W. Kowalsky et. al., "Optically controlled GaAs/AlAs multiple quantum well modulators employing integrated dielectronic reflectors," Appl. Phys. Lett. Vol. 52, p.1933, 1988.

[4] David A. B. Miller et. al., "Eletric-Field Dependence of Linear Optical Properties in Quantum Well Structures," IEEE J. Quantum Electron., QE-22 p. 1816, 1986.

[5] Shun Lien Chuang, *Physics of Optoelectronics Devices*, John Wiley & Sons, Inc., 1995.

[6] Tong San Koh et. al., " Exciton linewidth due to scattering by free carriers in semiconducting quantum well sructures: Finite confining potential model," J. Appl. Phys. Vol. 81, p. 2236, 1997.

[7] S. H. Park et al, "Measurement of room -temperature band-gap-resonant optical nonlinearities of GaAs/AlGaAs multiple quantum wells and bulk GaAs," Appl. Phys. Lett. Vol. 50, p. 1201, 1988.