

論文99-36D-6-5

자유 공간 광 연결 구조에 적합한 새로운 구조의 광 Thyristor (Novel Optical Thyristor for Free-Space Optical Interconnection)

李政昊*, 崔永完*

(Jeong-Ho Lee and Young-Wan Choi)

요약

본 논문에서는 자유 공간 광 연결 구조에 적합한 새로운 구조의 광 thyristor를 제안하고, 이 소자의 성능을 기존의 광 thyristor와 비교 평가하였다. 제안된 광 thyristor는 얇은 가운데 층들을 갖는 완전 공핍 광 thyristor로서 빠른 스위칭 속도와 향상된 광 반응성을 위하여 다중 양자 우물(multiple quantum wells)과 하부 거울층(bottom mirror)을 이용하였다. 기존 광 thyristor와의 성능 비교를 위한 모의실험은 전류 중심(current oriented) 연결 접합 모델(coupled junction model)과 박막층의 특성 행렬(thin film characteristic matrix), 그리고 van Roosbroeck-Shockley relation을 이용하였다. 모의 실험을 통하여 소자의 구성 물질, 두께, 불순물 농도등의 물리적 인자들이 같은 경우, 기존의 광 thyristor에 비하여 제안된 광 thyristor의 스위칭 에너지가 0.43 배 줄고, 발광 효율은 1.76 배 증가하며, 연동 동작(cascadable operation)시 bit-rate는 1.61 배 증가함을 알 수 있었다.

Abstract

We propose and analyze novel optical thyristor which can be used in free-space optical interconnection(FSOI). Novel optical thyristors are fully depleted optical thyristors(DOTs) using bottom mirror and/or multiple quantum wells (MQW), thereby its switching characteristics can be improved significantly. We obtain switching characteristics using coupled junction model associated with current oriented method. Emission characteristics of the DOT are obtained using thin film characteristic matrix and van Roosbroeck-Shockley relation. Compared to the performance using conventional DOT, the optical switching energy is decreased by a factor of 0.43 and the bit-rate is increased by a factor of 1.61 when the DOT with MQW and bottom mirror is employed for FSOI.

I. 서론

다양한 멀티미디어 서비스의 요구로 디지털 신호 처리(digital signal processing, DSP)를 수행하는 집적회로(integrate circuit)의 집적도, 대역폭(bandwidth)등이 증가함에 따라서 소자간 또는 회로간 연

결(interconnection)의 부담이 증가하고 있다. 기존의 전기적 연결 구조는 전자기 간섭(electromagnetic interference, EMI)에 민감하고, 에너지 소비량이 크며, 연결 거리에 따라 전송 속도가 제한을 받는 등의 문제점이 있으므로, 새로운 개념의 연결 구조인 자유 공간 광 연결 구조(free-space optical interconnection, FSOI)를 이용하여 전기적 연결 구조의 한계를 극복하려는 연구가 진행되고 있다.^[1-2] FSOI는 병렬성과 동작 성능이 연결 거리에 거의 영향을 받지 않는등의 장점을 갖기 때문에, chip 내 또는 chip-to-chip level에서 전기적 연결 구조와 경쟁력을

* 正會員, 中央大學校 電子工學科

(Department of Electronic Engineering, Chung-Ang University)

接受日字:1998年7月24日, 수정완료일:1999年4月27日

가진다. FSOI 구현을 위해서 필요한 소자의 동작 속도는 500 MHz에서 1 GHz 정도로, 장거리 광전송에 필요한 속도보다는 다소 느리더라도 간단한 구조와 작은 면적을 가지며, 수광과 발광의 특성을 함께 가지는 소자가 연구되고 있다.

FSOI 구현을 위한 광 스위칭 소자로는 자기 전광 소자(self electro-optic device, SEED)와 광 thyristor 등이 있다. SEED는 낮은 스위칭 에너지와 빠른 동작 속도 등을 갖는 다양한 구조가 발표되었으나,^[3, 4] 발광 특성이 없기 때문에 FSOI를 위해서는 발광 소자를 따로 제작해야 한다. 이에 비하여, 광 thyristor는 OFF 상태에서는 수광의 기능을, ON 상태에서는 발광의 기능을 수행하며, 단순한 구조, 빠른 반응속도, 적은 스위칭 에너지, 적은 에너지 소비량, 그리고 2차원으로의 집적이 용이하다는 등의 장점을 가진다.^[5-11] 특히, 완전 공핍 광 thyristor(fully depleted optical thyristor, DOT)^[5]는 단순 이극 구조이면서도, 기존의 광 thyristor가 가지는 느린 turn-off transient를 해결하여 매우 빠르게 동작한다. 그러나 기존의 DOT는 빛의 흡수가 일어나는 가운데 층의 두께가 매우 얇기 때문에 광 반응성(optical sensitivity)이 불량하다는 단점이 있으므로,^[6] 스위칭 속도가 빠르면서도 광 반응성을 향상시킬 수 있는 새로운 구조가 요구되고 있다.

본 논문은 새로운 구조의 광 thyristor에 대한 것으로, 얇은 가운데 층을 가지는 DOT 구조이면서도, 다중 양자 우물(Multiple quantum wells, MQW)^[12]과 하부 거울층(Quarter wavelength reflector stacks, QWRS)을 이용하여 기존 DOT에 비하여 스위칭 에너지는 낮고, 동작 속도는 향상된 다중 양자 우물 하부 거울층 완전 공핍 광 thyristor (MQW QWRS-DOT, MQ-DOT)를 제안하고 성능을 평가하였다.

II. 새로운 구조의 광 thyristor, MQ-DOT

광 thyristor의 단점인 느린 turn-off transient는 ON 상태에서 생성되어 가운데 층에 존재하는 과잉 전송자들(excess carriers)이 수 ms 정도의 시간이 걸리는 매우 느린 재결합 과정(recombination process)에 의해서만 없어져서 OFF 상태로 변환되기 때문이다.^[5] 이의 개선을 위해서 가운데 층에 전극을

제작하여 빠른 속도로 과잉 전송자를 제거하는 광 thyristor가 제안되었으나,^[7] 이 경우 구조가 복잡해 지므로 집적이 용이하지 않다. 이와 달리 DOT는 단순 이극 구조이면서도 가운데 층들을 매우 얇게 제작하여, 작은 역방향 전압으로도 소자의 가운데 전 영역이 공핍 영역(depletion region)이 되므로,^[5] 역방향 전압을 이용하는 것만으로도 ON 상태에서 생성된 과잉 전송자들을 표동 전류(drift current)의 형태로 매우 빠르게 제거할 수 있다. 특히, 두 개의 DOT를 병렬로 연결한 차분 구조(differential pair)의 경우 단일 소자를 이용한 스위칭 보다 매우 적은 광 에너지로 동작한다.^[8] 그러나, DOT는 가운데 흡수층이 얇기 때문에 광 반응성이 불량하므로, DOT만으로 정보를 전달하는 연동 동작(cascadable operation)의 경우에는 성능이 저하된다. Heremans 등의 실험에 의하면 충분히 큰 세기의 광원을 이용하는 경우 25 MHz로 동작하는 DOT라도 연동 동작 구조에서는 동작 속도가 10 MHz로 저하되었다.^[6] 이것은 DOT가 동작 전압내에서 매우 약한 광 세기를 갖는 빛을 발광하기 때문이다. 따라서 FSOI의 기본 동작인 연동 동작의 성능 향상을 위해서는 DOT의 발광과 수광 효율을 개선하여야 한다.

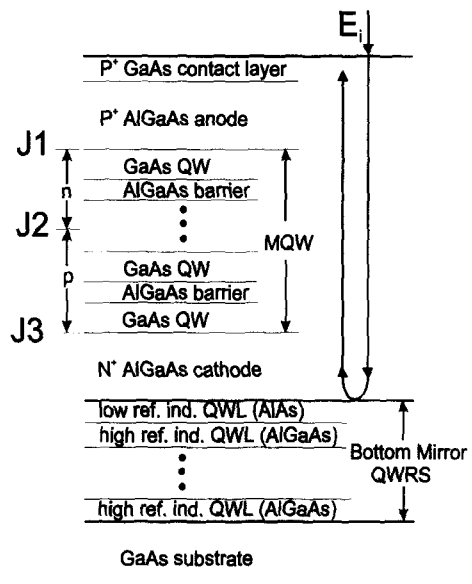


그림 1. 다중 양자 우물과 하부 거울층을 갖는 새로운 구조의 완전 공핍 광 thyristor, MQ-DOT

Fig. 1. Novel optical thyristor employing multiple quantum wells and bottom mirror, the MQ-DOT.

이를 위해서 본 논문에서 제안하는 새로운 구조의 DOT인 MQ-DOT의 구조를 그림 1에 나타내었다. MQ-DOT는 기존 DOT의 가운데 영역의 불순물 농도와 두께를 그대로 유지하여 빠른 동작 속도를 가지면서도, 가운데 층을 다중 양자 우물로 제작하고, 기판에 하부 거울층을 형성하여 광 반응성을 향상시킬 수 있다. 다중 양자 우물을 이용하면 동작 파장에서 여기자 흡수 피크를 가지므로 bulk 구조와 비교하여 약 2~3배 이상의 흡수 계수(absorption coefficient)를 가지게 되므로 수광 효율을 개선할 수 있다.^[12] 그리고, 하부 거울층을 이용하면 입사한 광 신호는 하부 거울층에 반사되어 다시 소자를 통과하므로 유효 광 흡수 거리는 하부 거울층이 없는 구조에 비하여 약 2배가 되어 광 반응성이 향상된다. 또한 ON 상태의 가운데 영역에서 발생한 광자(photon)는 하부 거울층에 반사되므로 발광 효율도 증대된다.

III. MQ-DOT의 소자 특성

그림 2는 대표적인 DOT의 S자형 전류-전압 특성 곡선과 차분 구도 DOT이다. 차분 구도의 경우, 불순물 농도, 두께, 온도 등의 물리적 차이로 인해서 차분 구도를 구성하는 두 DOT의 스위칭 전압에 차이가 존재하므로 전기적 신호만으로 스위칭 동작을 시키는 경우, 스위칭 전압이 보다 낮게 제작된 DOT만 스위칭된다.

따라서 차분 구도에서는 두 DOT의 스위칭 전압의 차이를 극복할 수 있는 최소한의 광 신호를 어느 한 DOT에 먼저 인가한 상태에서 스위칭 전압 이상의 외부 전압을 가하는 스위칭 방법이 이용되며, 이때 필요한 광 신호의 에너지가 차분 구도 DOT의 스위칭 에너지가 된다. 두 DOT가 동일하게 제작되어 스위칭 전압이 같은 이상적인 경우에는 열 잡음이 스위칭 에너지를 결정하므로 0.1 fJ 이하의 매우 작은 값을 가진다.^[10] 그러나 소자간의 물리적 차이는 제작 공정에서 나타나는 불가피한 요소로, 광 스위칭 에너지를 낮추는 실질적인 방법은 DOT의 광 반응성을 향상시켜서 두 DOT의 스위칭 전압의 차이를 보다 적은 광 에너지로 극복하는 것이다. 즉, 동일한 세기를 가지는 광 신호에 대한 스위칭 전압의 변화량(ΔV_s)이 크도록 소자의 구조를 개선함으로써 광 스위칭 에너지를 낮출 수 있다.

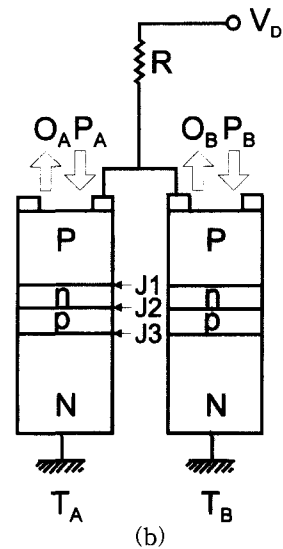
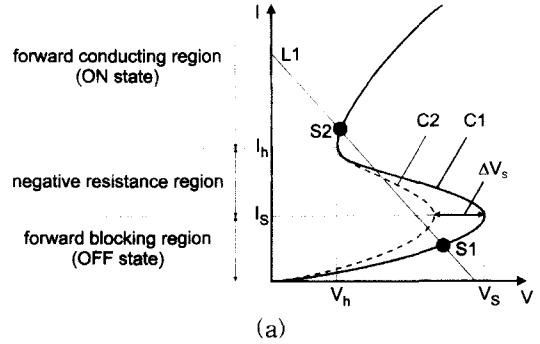
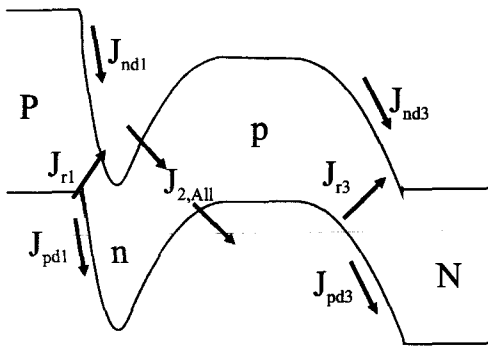


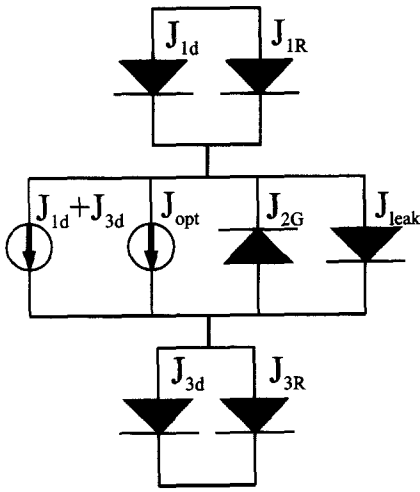
그림 2. (a) 대표적인 DOT의 S자 모양 비선형 전류-전압 특성 곡선 (b) 차분 구도 DOT
 Fig. 2. (a) Nonlinear S-shape current-voltage (I-V) characteristics of the DOT (b) Differential pair of the DOT.

새로운 구조에 따른 광 스위칭 에너지의 평가를 위해서는 ΔV_s 에 대한 고찰이 필요하며, D. A. Suda 등이 이용한 연결 접합 모델^[11]을 전류 중심으로 해석하여 모의 실험을 시행하였다. DC 상태($dV/dt \approx 0$)의 순방향 전도 영역과 음저항 영역에서 DOT의 접합 1과 3은 순방향 접합으로, 접합 2는 역방향 접합이다. 이때, 연결 접합 모델은 순방향 접합은 순방향 이상형 다이오드와 재결합 다이오드(recombination diode, J_r)를 병렬 연결한 것으로, 역방향 접합은 생성 다이오드(generation diode, J_g)와 광 생성 전류(optical generation current, J_{opt}), 그리고 손실 전류(leakage current, J_{leak})의 병렬 연결로 가정하여, thyristor의 특성을 해석하는 것이다. 그림 3은 연결 접합 모델을

위한 회로도와 소자 전체에 걸친 전류 성분을 나타낸 것이다.



(a)



(b)

그림 3. (a) 연결 접합 모델을 위한 회로도 (b) 에너지 밴드 diagram과 연결 접합 모델에서 사용하는 전류 성분

Fig. 3. Circuit diagram (a), energy band diagram and current components (b) for the coupled junction model.

접합 2로 흐르는 모든 전류의 합을 $J_{2,All}$ 이라 하면, 소자 전체에 걸친 전류 흐름의 연속성(continuity)은 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$J_{nd3} + J_{2,All} = J_{nd1} + J_{r1} \tag{1}$$

$$J_{pd1} + J_{2,All} = J_{pd3} + J_{r3} \tag{2}$$

여기서, $J_{(n,p)d(1,3)}$ 는 확산 전류(diffusion current), $J_{r(1,3)}$ 는 재결합 전류로 다음과 같다.^[13]

$$J_d = \frac{qD}{L} (n \text{ or } p) (e^{qv/kT} - 1) \tag{3}$$

$$J_r = \frac{qn_i W}{\tau_{rj}} (e^{qv/2kT} - 1) \tag{4}$$

여기서, D 는 확산 계수(diffusion coefficient), L 은 확산 거리(diffusion length), W 는 공핍층의 두께, τ_{rj} 는 재결합 수명(recombination lifetime)을 나타낸다. 한편, 소자가 이극 전극 구조이므로 입력과 출력 전류는 같으며, 이를 J_{total} 로 표시하면

$$J_{total} = J_{nd1} + J_{pd1} + J_{r1} \tag{5}$$

$$= J_{nd3} + J_{pd3} + J_{r3} \tag{6}$$

와 같다. J_{total} 을 변수로 하여, 식(5)와 식(6)으로부터 접합 1, 3의 전압 (v_1, v_3)을 구하고, 식(1) 또는 식(2)로부터 접합 2의 전압 (v_2)을 구하는 방법으로 DOT의 전류-전압 특성을 얻는다. 이때, $J_{2,All}$ 이 J_g 로만 구성된다 가정하여 모의 실험을 시행하면, 스위칭 전압이 매우 커지며(수 kV), 수 V 에서 스위칭되는 실험 결과와 다르다. 이것은 실제 DOT의 경우 가운데 층이 매우 얇기 때문에 작은 전압으로도 punch-through되어 thermionic emission current가 흐르게 되며, 지너 항복(Zener breakdown)과 애벌런치 항복(avalanche breakdown)과 같은 항복 효과(breakdown processes), 기생 저항(parasitic resistance), surface leakage등이 v_2 를 제한하기 때문이다. 이러한 일련의 전류 해석을 위해서 가운데 접합에 순방향 다이오드를 첨가하여 보상하였다.^[11] 순방향 다이오드에 의해 보상되는 전류를 J_{leak} 로 정의하면, J_{leak} 는 손실 전류뿐만 아니라, punch through, 항복 효과 등을 보상하는 전류 성분이다. 따라서, $J_{2,All}$ 은

$$J_{2,All} = J_{opt} + J_g + J_{leak} \tag{7}$$

이며, J_g 와 J_{leak} 는 다음과 같은 식을 사용한다.

$$J_g = \frac{qn_i W}{\tau_g} \tag{8}$$

$$J_{leak} = J_0 (e^{v/(nV_T)} - 1) \tag{9}$$

여기서, J_0 은 역 포화 전류 밀도(saturation current density), n 은 ideality factor, τ_g 는 생성 수명(generation lifetime)이다. 모의 실험에서는

MQ-DOT와 기존 DOT^[6]의 물리적 구조 즉, 각 층의 물질 구성, 두께, 불순물 농도등을 동일하게 하여 계산하였으며, GaAs(bulk)의 흡수 계수는

$$\alpha(\hbar\omega) \cong 5.6 \times 10^4 \frac{(\hbar\omega - E_g)^{1/2}}{\hbar\omega} \quad (10)$$

를 이용하였고,^[14] 동작 파장은 850 nm를 이용하였다. 모의 실험에서 이용한 DOT 소자의 구조는 그림 4와 같다.

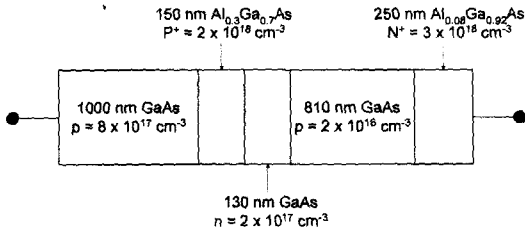
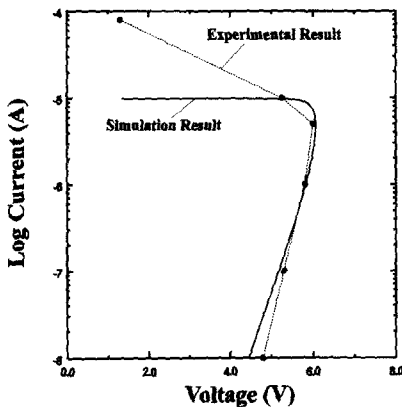
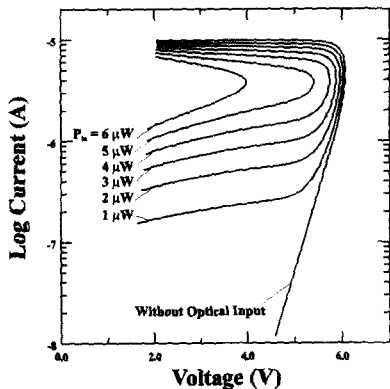


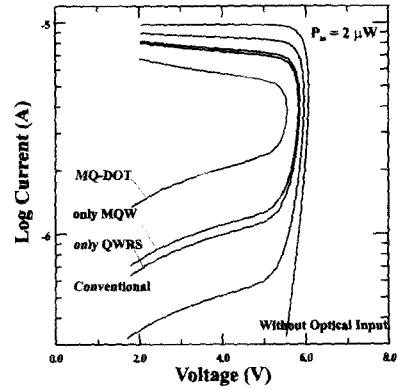
그림 4. 모의 실험에서 이용한 DOT의 구조^[6]
Fig. 4. The DOT structure that is used in simulation.



(a)



(b)



(c)

그림 5. (a) 실험(점선)과 연결 접합 모델을 이용한 모의 실험(실선)에 의한 전류-전압 특성 곡선 (b) 다양한 크기를 가지는 광 신호에 대한 전류-전압 특성 곡선의 변화 ($P_{in} = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 \mu W$) (c) 다양한 구조의 DOT에 대하여 동일한 세기($P_{in} = 2 \mu W$)를 가지는 광 신호를 인가한 경우에 전류-전압 특성 곡선의 변화

Fig. 5. (a) DC I-V characteristics comparing the experimental (dashed line) and simulation result using the coupled junction model (solid line) (b) I-V characteristics with various optical inputs ($P_{in} = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 \mu W$) (c) I-V characteristics of the various DOTs with the same optical input power ($P_{in} = 2 \mu W$).

그림 5(a)는 실험^[6]과 모의 실험에 의한 전류-전압 특성을 나타낸 것으로, 기존 DOT와의 비교를 통해서 $J_0 = 10^{-10} A/cm^2$, $n = 8$, $\tau_f = 6 \times 10^{-10} s$ 를 fitting parameter로 사용하였다. 모의 실험에서 thyristor의 전류-전압 특성에 영향을 줄 수 있는 파라미터로는 J_{leak} 와 J_r 이 있다. 특히 가운데 접합에 사용되는 전류 성분인 J_{leak} 는 전류-전압 특성에 가장 큰 영향을 주는 변수로, D. A. Suda등이 사용한 것과 같이 보통의 전류 성분보다 큰 ideality factor를 가지며, 실험과 모의 실험의 fitting을 위한 전류 성분이다. 전류 중심 연결 접합 모델을 이용하면, 스위칭 이후 J_{leak} 의 증가가 확산 전류의 증가를 매우 앞지르기 때문에 (식(1) 또는 식(2)) 음 저항 영역에서 다소의 차이가 있지만, 스위칭 전압과 순방향 비전도 영역을 예측할 수 있었다. 또한 모의 실험으로 그림 5(b)에서 보는 바와 같이 외부 광 신호에 따른 스위칭 전압의 변화를 예측할 수 있었다.

MQ-DOT의 가운데 n-p 접합은 GaAs(100 Å)와 $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ (25 Å)의 적층에 의한 다중 양자 우물로 구성된다고 가정하였다. 다중 양자 우물을 이용하는 경우, p-i-n 다이오드에 대한 실험에서는 850 nm의 동작 파장에서 약 23000 cm^{-1} 의 흡수계수를 가지지만,^[12] MQ-DOT의 흡수층은 불순물이 첨가된 반도체층이기 때문에 전계가 일정하지 않으므로 흡수 계수의 크기는 다소 작아지므로,^[15] 모의 실험에서는 20000 cm^{-1} 를 이용하였다. 하부 거울층은 AlAs(716 nm)와 $Al_{0.1}Ga_{0.9}As$ (611 nm)를 적층시키는 QWRS를 가정하였다. 이 경우, 박막층 특성 행렬을 이용하면, 동작 파장 850 nm에서 반사율(reflectivity)이 0.97로 입사된 대부분의 빛이 소자를 다시 통과하여 광 흡수에 기여하므로, 유효 광 흡수 거리는 2배로 가정하였다. 그림 5(c)는 기존의 DOT, 하부 거울층만을 가지는 DOT, 다중 양자 우물만을 가지는 DOT, MQ-DOT 등에 일정한 크기(2 μW)를 가지는 외부 광신호를 인가한 경우의 전류-전압 특성 곡선을 나타낸 것으로, 새로운 광 DOT 구조들은 ΔV_s 가 기존 구조의 DOT에 비하여 큼을 알 수 있다. 즉, 기존의 DOT, 하부 거울층만을 가지는 DOT, 다중 양자 우물만을 가지는 DOT, MQ-DOT 순으로 보다 적은 광 신호만으로도 동일 스위칭 전압을 얻을 수 있었다. 차분 구조의 스위칭에 있어서 필요한 ΔV_s 는 수십 mV 정도이며, 이 범위에서 동일한 ΔV_s 를 얻기 위해 기존의 DOT에서 필요한 광신호의 세기와 다양한 구조의 DOT에서 필요한 광신호 세기의 비는 ΔV_s 의 크기에 관계없이 구조마다 거의 일정하며, 표 I에 그 값들을 나타내었다. 표 I에서 MQ-DOT는 기존 DOT의 동작에 필요한 광 에너지의 0.43 배만으로 동작할 수 있으며, 수광 효율은 2.3 배 증가함을 알 수 있었다.

DOT만으로 FSOI를 구성하는 경우 DOT는 수광 소자로서의 역할 뿐만 아니라 ON 상태에서 발광 다이오드(light emitting diode, LED)로서의 역할도 수행하므로 DOT의 발광 특성 또한 중요한 요소이다. 발광 다이오드 내에서 생성된 광자는 물질 손실(material loss), fresnel 손실, critical angle 손실 등의 세 가지 손실 과정을 겪는다.^[13] MQ-DOT의 가운데 접합에서 광자가 생성된다는 가정을 하는 경우, MQ-DOT는 이중 이중 접합(double-heterostructure) 구조이기 때문에 물질 손실은 무시할 수 있다. 또한 가운데 영역에서 생성되어 곧

바로 소자 밖으로 나가는 광자와 반사되어 소자 밖으로 나가는 광자는 평균적으로 같은 광 경로를 거치게 되므로 같은 크기의 fresnel 손실을 겪는다. 따라서 반사된 광자에 있어서 critical angle 손실만이 고려 대상이며, 박막층 특성 행렬을 이용하면 GaAs의 critical angle 16도 내에서의 평균 반사율은 0.957이 된다. 따라서 하부 거울층을 사용하는 경우 total photon flux는 1.957 배만큼 증가하여, 발광 효율의 증대를 가져온다.

표 1. 다양한 DOT 구조에 따른 스위칭 에너지의 비

Table 1. The required switching energy ratios for obtaining equal ΔV_s between the conventional DOT structure and the various novel DOT structures.

DOT의 구조	스위칭 에너지의 비
기존의 구조	1
하부 거울층만을 사용하는 경우	0.62
다중 양자 우물만을 사용하는 경우	0.58
MQ-DOT	0.43

다중 양자 우물을 사용하는 경우에 있어서의 발광 효율도 기존의 구조와 total photon flux의 비를 이용하여 구할 수 있다. 이때, total photon flux는^[15]

$$\Phi_0 = V_l \int_0^\infty r_{sp}(E) dE \quad (11)$$

와 같이 표현되며, V_l 은 active region volume, r_{sp} 는 spontaneous emission rate이다. 이때, r_{sp} 는 흡수 계수와 van Roosbroeck-Shockley relation^[16]으로부터 구할 수 있다.

$$r_{sp} = \frac{\alpha(\hbar\omega) n^2 (\hbar\omega)^2}{\pi^2 \hbar^3 c^2 (\exp\{\hbar\omega/(kT)\} - 1)} \quad (12)$$

여기서, α 는 파장의 변화에 따른 흡수 계수의 변화를 나타내며, n 은 유효 굴절률(effective refractive index)을 나타낸다. bulk의 경우와 다중 양자 우물을 사용하는 경우에 있어서 파장에 따른 spontaneous emission rate를 파장에 따라서 적분하면 다중 양자 우물을 사용하는 경우가 bulk한 구조에 비하여 그 값이 1.13 배 증가한다. 그러나 MQW를 사용하는 경우

가운데 층을 구성하는 GaAs의 길이는 10/12.5만큼 줄어들어 V_i 이 감소하므로, 식(11)로부터 소자간의 total photon flux 비는 0.90로 감소하여, MQW만을 사용하는 경우 발광 효율은 감소함을 알 수 있다.

앞서 모의 실험을 통하여 구한 수광 효율과 발광 효율을 이용하여 새로운 구조를 가지는 MQ-DOT의 성능을 평가하기 위해서는 실제적인 동작 방법을 살펴 필요가 있다. 그림 6은 DOT가 연동 동작으로 1 bit 전송을 하는 경우의 pulse stream과 timing diagram이다. τ_{reset} 동안 첫단의 DOT인 DOT_A는 OFF 상태에서 ON 상태로 전이하며, 발광하기 시작한다. 동시에 다음단의 DOT인 DOT_B는 이전 상태와는 상관없이 OFF 상태로 전이하여 평형 상태(equilibrium state)에 있게 된다. 한편, τ_{rise} 동안에는 τ_{reset} 동안과는 정반대의 동작이 DOT_A와 DOT_B에 일어난다. $\tau_{transfer}$ 동안에는 DOT_A는 발광하며, E_s 의 에너지를 가지는 광 신호를 DOT_B가 수광한다. 따라서 연동 동작시 1-bit 전송에 필요한 시간은

$$\tau(bit) = \tau_{transfer} + \tau_{rise} + \tau_{reset} \quad (14)$$

이다. 이때 필요한 $\tau_{transfer}$ 는 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.^[9]

$$\tau_{transfer} = \frac{E_s}{P_{el}\eta_E\eta_O\eta_D} \quad (13)$$

여기서, P_{el} 은 DOT_A에 공급되는 전력이며, η_E 는 전력의 광 전력으로의 변환 효율(electrical to optical power conversion efficiency), η_O 는 광 전송 효율

(optical transmission efficiency), 그리고 η_D 는 수광 효율(detection efficiency)이다. 실험에서 광 스위칭 에너지는 $15 \text{ aJ}/\mu\text{m}^2$, $\tau_{rise} = \tau_{reset} = 22.5 \text{ ns}$, $\tau_{transfer} = 45 \text{ ns}$ 로 bit-rate는 11 Mb/s였다.^[9] 이때, τ_{rise} 와 τ_{reset} 은 소자의 구조 특성, 특히 가운데 접합의 길이와 불순물 농도 등의 물리적 특성에 따라 결정되는 값으로, ON 상태이후의 가운데 접합에 남아 있는 과잉 전송자를 일소시키는데 필요한 시간이다. 본 논문에서 MQ-DOT와 기존 DOT는 동일한 물리적 특성을 가진다고 가정하므로, 모든 구조는 같은 크기의 τ_{rise} 와 τ_{reset} 을 가진다고 가정할 수 있다. 따라서 bit-rate는 $\tau_{transfer}$ 에 의해서 결정되며, 앞서 구한 발광과 수광 효율의 비, 그리고 식(13)을 이용하여 구할 수 있다. 표 II는 다양한 구조를 가지는 DOT의 bit-rate를 나타낸 것으로, MQ-DOT의 bit-rate는 기존 DOT의 bit-rate보다 1.61배 증가함을 알 수 있다. 이는 기대치보다 낮은 성능 향상으로 $\tau_{transfer}$ 가 4.05배 성능 향상된 것과 매우 큰 차이가 있는데, 식(14)에서 $\tau_{transfer}$ 의 감소와는 달리 τ_{rise} 와 τ_{reset} 는 22.5 ns이라는 매우 큰 값을 갖기 때문이다. 그러나, τ_{rise} 와 τ_{reset} 는 실험에 사용된 함수 발생기(function generator)와 실험 set-up의 한계에 의한 것으로 실제로는 수 ns에서 수 ps의 매우 작은 값을 가질 수 있다.^[10] 따라서 동일한 실험 조건에서 예상할 수 있는 MQ-DOT의 bit-rate의 증가분은 1.61배 정도지만, τ_{rise} 와 τ_{reset} 를 최소한으로 줄이는 경우 bit-rate는 약 4배까지 향상될 수 있다.

표 2. 다양한 구조를 가지는 DOT의 발광과 수광 효율의 향상비, 그리고 이 소자들의 연동 동작 시 $\tau_{transfer}$ 의 감소비와 bit-rate의 향상비

Table 2. Emission and detection efficiency, $\tau_{transfer}$, bit-rate improvement ratios of the various DOT structures using in cascable operations.

소자 구조	발광 효율의 향상	수광 효율의 향상	$\tau_{transfer}$, ns (ratio)	bit-rate, Mb/s (ratio)
기존의 DOT	1	1	45(1.00)	11.1(1.00)
다중 양자 우물만 사용한 DOT	0.90	1.7	29(1.53)	13.5(1.22)
하부 거울층만 사용한 DOT	1.96	1.6	14(3.13)	16.9(1.53)
MQ-DOT	1.76	2.3	11(4.05)	17.9(1.61)

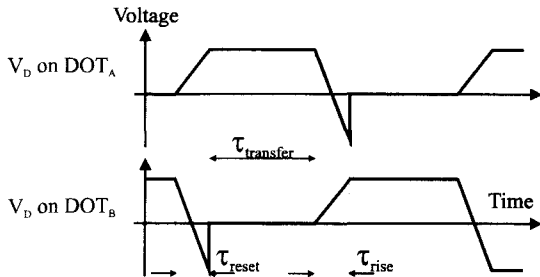


그림 6. DOT의 연동 동작으로 1 bit 전송을 하는 경우의 pulse stream과 timing diagram

Fig. 6. Pulse stream and timing diagram for transferring 1 bit in DOT cascaded operation.

MQ-DOT에 있어서 다중 양자 우물을 사용하는 경우 수광 효율은 향상되지만 발광 효율은 감소된다. 또한 특정 동작 파장에서만 여기자 흡수 피크를 가지므로 단일 수광 소자로서는 동작 특성의 향상을 기대할 수는 있으나, 20 nm 이상의 FWHM(full-width half-maximum)^[6]을 가지며 빛을 발광하는 DOT에 의해서 연동 동작을 하는 경우 다중 양자 우물의 적용으로 인한 시스템의 향상은 크게 기대할 수 없다. 그러나 하부 거울층만을 사용하는 경우, 기존 DOT와 물리적 인자들을 동일하게 만들면서 발광 효율과 수광 효율의 증대를 가져오기 때문에 기존의 빠른 동작 속도를 유지하면서도 광 반응성을 향상시킬 수 있다. 3 femto-Joule의 광 스위칭 에너지와 155 Mbit/s의 동작 속도를 가지는 광 thyristor가 발표된 바 있으며,^[10] 이 경우 연동 동작의 경우가 아니라도 하부 거울을 사용하는 경우 약 1.9 femto-Joule의 광 스위칭 에너지만으로 동작하는 성능 향상이 기대된다.

MQ-DOT 구조의 최적화는 기존 DOT의 최적화와 관련된 문제이다. 즉, 기존 DOT의 최적화된 구조에 다중 양자 우물과 하부 거울층 만을 첨가함으로써 최적의 MQ-DOT를 생성할 수 있기 때문이다. 기존 DOT 구조의 최적화는 동작 속도와 동작 전압, 발광, 수광 효율의 최적화를 위한 소자의 파라미터 최적화에 대한 연구로 진행되고 있다.^[8, 17] MQ-DOT의 경우, 기존 DOT의 최적화 이외에 이미 많은 연구가 진행된 다중 양자 우물과 하부 거울층 설계의 최적화를 그대로 이용하면 될 것이다.

IV. 결 론

발광과 수광의 기능을 동시에 가지는 DOT는 FSOI 구성에 필요한 기본 소자의 하나로 인식되고 있다. FSOI를 DOT만으로 구성하는 경우, 매우 얇은 가운데 영역을 가지는 소자 구조 특성상 광 반응성이 불량하므로, 이에 대한 개선이 필요하다. 이에 본 논문에서는 다중 양자 우물과 하부 거울층을 이용하는 새로운 구조의 MQ-DOT를 제안하고, 연결 접합 모델과 박막층 특성행렬, 그리고, van Roosbroeck-Shockley relation을 이용하여 기존의 DOT와의 발광과 수광 성능을 비교 평가하였다. MQ-DOT는 매우 얇은 가운데 접합층을 가지므로 집적회로에 사용되는 전압으로 완전 공핍되어 파인 전송자를 일소할 수 있기 때문에 빠른 동작 속도를 가지면서도, 모의 실험을 통하여 광 흡수에 기여하는 다중 양자 우물과 하부 거울층을 이용하기 때문에 기존 구조보다 수광 효율은 2.3배 증가하고 발광 효율은 1.76배 증대하였다. 또한, MQ-DOT만으로 연동 동작을 하는 경우, bit-rate는 기존 구조에 비하여 1.61배 증가함을 예상할 수 있었다. 따라서 MQ-DOT는 기존 DOT에 비하여 발광과 수광 효율의 증대로 FSOI에 적합하다.

참 고 문 헌

- [1] John E. Midwinter, *Photonics in Switching*, Academic Press, Inc., 1993.
- [2] Frank A. P. Tooley, "Challenges in Optically Interconnecting Electronics", *IEEE Journal of selected topics in quantum electronics*, vol.2, no.1, pp.3-13, 1996.
- [3] Y. W. Choi, O. K. Kwon, and E. H. Lee, "Improved Performances of a S-SEED Using Extremely Shallow QWs and Asymmetric Fabry-Perot Cavity Structure", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol.5, no.12, p.1406, 1993.
- [4] Y. W. Choi, "Analysis of Switching Dynamics of Asymmetric Fabry-Perot Symmetric Self-Electrooptic Effect Devices with Extremely Shallow QWs", *J. of Appl. Phys.*, vol. 82, no. 4, p.1936, 1997.
- [5] M. Kuijk, P. L. Heremans, G. Borghs, and R. Vounckx, "Depleted double-

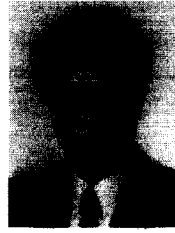
- heterojunction optical thyristor”, *Appl. Phys. Lett.*, vol.64, no.16, pp.2073-2075, 1994.
- [6] P. L. Heremans, M. Kuijk, B. Knupfer, R. Vounckx, and G. Borghs, “8 x 8 Array of Cascadable Differential Pairs of Optical Thyristors for Parallel Optical Interconnects”, *IEEE Trans. Electron Devices*, vol.42, no.12, pp.2056-2061, 1995.
- [7] K. Kasahara, Y. Tashiro, N. Hamao, M. Sugimoto, and T. Yanase, “Double heterostructure optoelectronic switch as a dynamic memory with low-power consumption”, *Appl. Phys. Lett.*, vol.52, no.9, pp.679-681, 1988.
- [8] K. Hara, K. Kojima, K. Mitsunaga, and K. Kyuma, “AlGaAs-GaAs pnpn Differential Optical Switch”, *IEEE Quantum Electronics*, vol.28, no.5, pp.1335-1342, 1992.
- [9] H. Thienpont, A. G. Kirk, A. Goulet, V. Baukens, R. Buczynski, P. Heremans, G. Borghs, M. Kuijk, R. Vounckx, I. Veretennicoff, “Free-space optical interconnect and processing demonstrators with arrays of light-emitting thyristors”, *SPIE Optoelectronics '97*, [3002-21], 1997.
- [10] G. Bickel, P. L. Heremans, M. Kuijk, R. Vounckx, G. Borghs, “Receiver with optical thyristors operating at 155Mbit/s with 3 femto-Joule optical inputs”, *Appl. Phys. Lett.*, vol.70, no.6, pp.750-752, 1997.
- [11] D. A. Suda, E. Hayes, A. S. Rohlev, “Transient Analysis of p-n-p-n Optoelectronic Devices”, *IEEE Trans. Electron Devices*, vol.39, no.8, pp.1858-1864, 1992.
- [12] Mark Whitehead, “Optimization of normal-incidence GaAs-AlGaAs multiple quantum well optical modulators”, Ph.D thesis, University of London, 1990.
- [13] S. M. Sze, *Physics of semiconductor device*, New York: Wiley, 1981.
- [14] Jasprit Singh, *Optoelectronics*, McGRAW-HILL, 1996.
- [15] P. Bhattacharya, *Semiconductor Optoelectronic Devices*, Prentice, 1994.
- [16] Karl Joachim Ebeling, *Integrated Optoelectronics*, Springer-Verlag, 1992.
- [17] Kunihiko Hara, Takashi Iwamoto, Kazuo Kyuma, “Optimum Design of Pnpn Double Heterostructures Using Simulated Annealing”, *Japanese Journal of Applied Physics*, vol.32, Pt.2, No.1A/B, pp.L68-L70, 1993.

저 자 소 개



李 政 暎(正會員)

1971년 9월 12일생. 1996년 중앙대학교 전자공학과(공학사). 1998년 중앙대학교 전자공학과(공학석사). 1998년 ~ 현재 현대전자 통신연구소 연구원. 주관심분야는 광통신, 광 스위칭 시스템 및 소자



崔 永 完(正會員)

1962년 5월 30일생. 1985년 서강대학교 전자공학과(공학사). 1987년 버팔로 뉴욕주립대(SUNY at Buffalo), 전기 미 컴퓨터공학과(공학석사). 1992년 버팔로 뉴욕주립대(SUNY at Buffalo), 전기 미 컴퓨터공학과(공학박사). 1992년 ~ 1995년 한국전자통신연구원(ETRI), 선임연구원. 1995년 ~ 현재 중앙대학교 전자공학과 부교수. 주관심분야는 광전자, 광통신, 광 스위칭 시스템 및 소자, Microwave-Photonics, Optical-CDMA