

논문 2004-41SD-1-5

# 1.561 $\mu\text{m}$ 에서 동작하는 MQW 도파로형 Depleted Optical Thyristor의 레이징 특성 분석

## (Lasing Characteristics of MQW Waveguide-type Depleted Optical Thyristor Operating at 1.561 $\mu\text{m}$ )

최운경\*, 김두근\*, 최영완\*, 이석\*\*, 우덕하\*\*, 김선호\*\*

(Woon Kyung Choi, Doo-Gun Kim, Young-Wan Choi, Seok Lee, Deok-Ha Woo, and Sun-Ho Kim)

### 요 약

본 연구에서는 광통신 시스템에 응용할 수 있는 InGaAs/InGaAsP 다중 양자 우물의 장파장용 완전 공핍 광 싸이리스터(depleted optical thyristor)를 제안하고, 도파로 형태로 소자를 제작하여, 최초로 레이징 특성을 측정 분석하였다. 먼저, 완전 공핍 광 싸이리스터에 있어서 스위칭 전압과 전류는 각각 4.63 V 와 10  $\mu\text{A}$ 로 측정되었고, 홀딩 전압(holding voltage)과 전류는 각각 0.59 V, 20  $\mu\text{A}$ 에서 그 특성이 나타났다. 또한, 레이징 되는 문턱 전류(threshold current)는 25  $^{\circ}\text{C}$ 에서 111 mA, 10  $^{\circ}\text{C}$ 에서 72.5 mA로 각각 나타났으며, 문턱 전류의 약 1.41배에 해당하는 동작 전류에서 측정된 레이징 중심 파장은 1.561  $\mu\text{m}$ 로 나타남을 확인하였다.

### Abstract

We present the first demonstration of waveguide-type depleted optical thyristor laser diode with InGaAs/InGaAsP multiple quantum well structure. The measured switching voltage and current are 4.63 V and 10  $\mu\text{A}$  respectively. The holding voltage and current are respectively 0.59 V, 20  $\mu\text{A}$ . The lasing threshold current at the temperature of 25  $^{\circ}\text{C}$  and 10  $^{\circ}\text{C}$  are 111 mA and 72.5 mA, respectively. The lasing wavelength is centered at 1.561  $\mu\text{m}$  at a bias current equal to 1.41 times threshold.

**Keywords:** 완전 공핍 광 싸이리스터(depleted optical thyristor), 유한 차분 방법, 광 컴퓨터, 광 하드 리미터(optical hard-limiter), 광 CDMA(code division multiple access)

### I. 서 론

최근 들어 광 스위칭 소자와 광 스위칭 기술을 이용한 광 네트워크의 전체적인 성능 향상에 더욱 큰 관심이 집중되고 있다. 이는 완전 광통신 구현에 있어서 광 신호의 스위칭과 논리 연산자 처리 (logic process)를 전자 신호

로 변환시키지 않고, 전광 영역 (optical-domain)에서 속도에 제한 받지 않고 구현하는 것이 바람직한 방식이기 때문이다. 따라서 광 논리 기능 소자에 대한 연구는 광프로세스, 광메모리, 광컴퓨터 및 광교환 등의 미래 정보 통신을 가능케 하는 필수적인 연구 분야이며 그 기술적 필요성이 절실히 요청되고 있다. 그 중에서 vertical to surface transmission electrophotonic device (VSTEP), light amplifying optical switch (LAOS), heterojunction phototransistor light emitting diode (HBT-LED), double heterostructure optoelectronic switch (DOES), pnpn-vertical cavity surface emitting laser (VCSEL) 등이 대표적인 소자이다.<sup>[1-4]</sup> 그러나 상대적으로 느린 스위

\* 정회원, 중앙대학교 전자전기공학부  
(of Optoelectronics and Optical Communications, Chung-Ang University)

\*\* 정회원, 한국과학기술연구원 광기술연구센터  
(shotonics research center, KIST)

※ 이 논문은 2003년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음. (KRF-2003-041-D20401)

접수일자 : 2003년6월23일, 수정완료일 : 2004년1월6일

칭 속도는 pnpn 소자에서 매우 중요한 제한요인이다. 일반적인 pnpn 소자들은 on 상태에서 가운데 영역에 잉여 다수 캐리어에 의해 매우 느린 재결합 과정을 갖는다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 완전 공핍 광 싸이리스터 (depleted optical thyristor, DOT)가 제안되었다.<sup>[5]</sup> 이는 on 상태에서 p-n 접합 가운데 영역의 잉여 캐리어를 짧은 역방향 펄스를 인가함으로써 제거해주는 방법이다. 역방향 전압 펄스를 인가하면, DOT의 가운데 영역에서 보다 짧은 시간에 모든 캐리어를 완전 공핍 시킬 수 있다. 다시 말해, DOT는 두 개의 노드를 갖는 단순하면서도 고속 스위칭 속도를 갖는 소자이다. 그러나 대부분의 DOT 연구에서 광접속의 목적으로 표면 수직 방출 구조에 집중되어 온 반면, 도파로형 광 싸이리스터 (waveguide-type DOT, WDOT)에 대한 연구가 간과되었다.<sup>[6]</sup> double heterostructure optoelectronic switch (DOES)가 처음으로 InP/InGaAsP 물질 구조에서 Swoger<sup>[7]</sup>에 의해서 제안되었는데, 이는 가운데 영역에 n-형의 얇은 박막 층을 삽입하였다. 그러나 DOT 구조는 가운데 영역의 도핑 농도를 낮추어 역방향 전압을 인가할 때 모든 캐리어를 제거할 수 있다. 이는 InP/InGaAsP 물질 시스템에서 다른 이중 접합 구조의 소자들과 구분되는 점이다. 이에 WDOT-LD는 광 CDMA (code division multiple access), 광인터넷, 광 ATM (asynchronous transfer mode)과 같은 앞으로의 광통신 시스템에 응용할 수 있다. 광 ATM 시스템에서 논리 연산을 수행할 수 있는 패킷 스위칭 소자로, 혹은 광 하드-리미터(hard-limiter)의 역할 등 많은 잠재력을 갖는다. 본 논문에서는 WDOT-LD에 대한 구조 및 동작원리를 살펴보고, 모의실험을 통하여 설계하였으며, 제작된 소자의 레이징 특성에 대하여 측정, 분석하였다.

II. 도파로 형 완전 공핍 광 싸이리스터 레이저 다이오드(WDOT-LD)

광 싸이리스터의 기본적인 구조는 그림 1(a)에서 보는 바와 같이 3 개의 p-n 접합 ( $J_1, J_2, J_3$ )으로 이루어진 4층 구조 PnpN 접합으로 구성되어 있다. 광 싸이리스터의 효율적인 광 스위칭을 위해서는 빛이 가운데 영역에서만 흡수되어 광전류 생성에 기여하여야 하므로 대개  $J_1$ 과  $J_3$ 가 이중 접합인 이중 이중 접합(double-hetero junction)을 사용한다. 그림 1(b)는 싸이리스터의 전류-전압 특성 곡

선( $C_i$ )으로 s자 모양의 비선형 특성을 가지며, (i) 순방향 비전도(forward blocking) 영역으로 높은 임피던스의 off 상태, (ii) 부정 저항(negative resistance) 영역, (iii) 순방향 전도(forward conducting) 영역으로 낮은 임피던스의 on 상태로 나눌 수 있다.

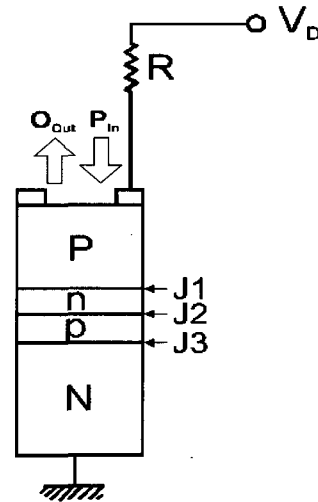
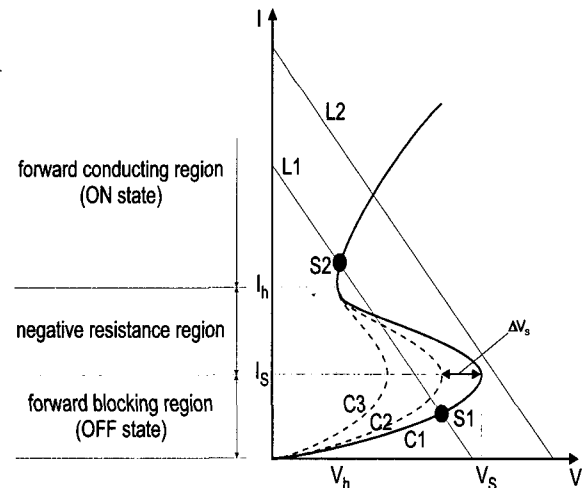


그림 1. (a) 광 싸이리스터 기본구조. Fig. 1. (a) basic structure of optical thyristor.



(b) 광 싸이리스터의 s자 모양 비선형 전류-전압 특성곡선  
(b) non-linear s-shape I-V characteristics of optical thyristor.

적당한 외부 전압( $V_D$ )과 외부 저항( $R$ )을 연결하면 부하선(load line)  $L_1$ 이 정해지며, 특성 곡선과 두 개의 안정된 동작점을 결정하는데, (bi-stability) 동작점  $S_1$ 은 off

상태를, 동작점  $S_2$ 는 on 상태를 나타낸다.  $I_h$ 와  $V_h$ 는 홀딩 포인트(holding point)로, 각각 홀딩 전류, 홀딩 전압을 나타낸다.  $I_s$ 와  $V_s$ 는 각각 스위칭 전류, 스위칭 전압으로 이 점을 경계로 off 상태에서 on 상태로의 스위칭이 일어난다. 그림 1(a)와 같은 단일 소자는  $V_D$ 를 스위칭 전압 이하로 가한 상태에서 충분한 크기를 가지는 광 신호를 인가하여, 전류-전압 특성 곡선을 변화시켜서 스위칭을 하게 한다. 광 신호는 가운데 접합의 공핍 영역(depletion region)에서 흡수되어 광 전류를 발생시키며,  $C_1$ 의 상태에서 광신호가 인가되면  $C_2$ ,  $C_3$ 로 스위칭 전압을 작게 만들어 스위칭 한다. 광 싸이리스터는 스위칭 이후에  $V_D$ 를 제거하더라도 off 상태로 되기까지는 수 msec에 이르는 매우 긴 시간이 요구된다. 이러한 점을 개선하기 위해서, 광 싸이리스터에 음 전압 필스를 인가하면 turn-off transient가 빨라지는데, 이러한 특성을 이용하여 단순 이극 구조이면서 빠른 turn-off transient( $\sim$ 수 psec 이내)를 가지는 완전 공핍 광 싸이리스터가 Kujik 등에 의해서 제안되었다. DOT는 광 싸이리스터의 가운데층의 두께를  $1\mu\text{m}$  이하로 매우 얇게 제작하여, 작은 역방향 전압으로도 양 끝단을 제외한 소자의 전 영역이 공핍 영역이 되는 구조적 특징을 갖는 광 싸이리스터를 말한다. DOT는 음 전압 필스를 이용하여 on 상태에서 생성되어 가운데 영역에 존재하는 파인 전송자들을 표동전류의 형태로 매우 빠르게 제거한다. 이때 필요한 역방향 전압은 집적 회로 구동에 필요한 낮은 전압으로 충분하므로, 단순 이극 구조의 DOT는 집적이 용이한 구조이다.

### III. 실험 및 결과

본 실험에서는 다중 양자 우물 PnpN 구조의 도파로형 완전 공핍 광 싸이리스터 레이저 다이오드(MQW WDOT-LD)를 설계 제작하여 그 특성을 측정, 분석하였다. metal organic chemical vapor deposition (MOCVD)로 성장된 구조는 다음과 같다.  $N^+$ -InP 층(500nm,  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ), P-InP 층(300nm,  $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ), 6개의 다중 양자 우물 p-InGaAs 층(7nm,  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ )과 그 장벽 p-1.25Q 층(10nm,  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ), 도핑이 되지 않은 단일 양자 우물 InGaAs 층(6nm)과 그 장벽 1.25Q의 도핑이 안된 층(10nm), 6개의 다중 양자 우물 n-InGaAs 층(7nm,  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ )과 그 장벽 n-

-InP 층(10nm,  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ), N-InP 층(300nm,  $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ),  $P^+$ -InP 층(500nm,  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ),  $P^+$ -InGaAs contact 층(100nm,  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ )으로 이루어져 있다. 여기에서는 빛의 방사 효율을 증가시키기 위하여 도핑이 되지 않은 단일 양자 우물 층을 WDOT-LD의 활성영역 가운데 부분에 삽입시켰다. 이 단일 양자 우물은  $1.5 \mu\text{m}$ 의 파장 영역에서 레이징 특성이 나타나도록 제작하였다. 흡수가 일어나는 p-n 접합의 공핍층을 이루는 물질을 6층의 다중양자우물로 구성하여 여기자 흡수 피크에 의한 sensitivity 증가와 광 출력 효율 및 스위칭 속도를 향상시키도록 했다. 또한, 완전 공핍을 이루기 위하여 가운데 활성영역의 두께와 도핑 농도를 최적화 작업을 통하여 설계하였다. 최적화 작업은 유한차분 방법(finite difference method)을 이용한 모의 실험을 통하여, 각 층에 있어서의 도핑 농도와 두께를 고려하였다.<sup>[8-9]</sup> 빠른 스위칭 속도와 낮은 스위칭 에너지를 갖기 위해 보다 낮은 역방향 전압에서도 완전 공핍을 이루어야 하는데, 이를 위하여 가운데 영역을 얇게 설계하였다. 물론 가운데 영역의 활성층이 너무 얇게 되면, 순방향 전압에서 광 싸이리스터의 비선형 특성이 사라지게 되므로, 순방향 영역과 역방향 영역을 모두 고려한 WDOT-LD 구조를 가져야한다. 소자는 도파로 형태로 제작하였다. 그 이유는 수직 입사의 형태에서는 얇은 가운데층에서는 충분한 빛의 흡수가 일어나지 않지만, 도파로의 형태로 제작된 광 싸이리스터는 얇은 활성 영역에 무관하게 충분한 빛의 흡수를 나타낼 수 있다. 소자의 제작에 있어서는, 건식 식각(reactive ion etching) 대신에 광도파로에서의 가능한 ion damage를 줄이기 위하여 선택적인 습식 식각(wet etching) 기술이 적용되었으며, 활성 영역까지 단게 하기 위해서 식각 깊이는 약  $0.9 \mu\text{m}$ 로 하였다. ridge waveguide 폭은  $6 \mu\text{m}$ 이며, Silicon dioxide가 p와 n contact의 전기적인 절연을 위하여 plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD)에 의해  $0.3 \mu\text{m}$  증착 되었다. 광 도파를 위해서 폴리이미드(polyimide)를 도파로 양옆에 burying 하였다.  $P^+$ -ohmic contact는 lift-off 공정을 이용하여 Ti/Pt/Au를 증착 하였고, pad pattern contact은 Ti/Au를 증착 하였다. InP substrate 층을  $200 \mu\text{m}$  이하가 되도록 lapping을 한 후,  $N^+$ -contact은 Ti/Au를 증착 하였다.

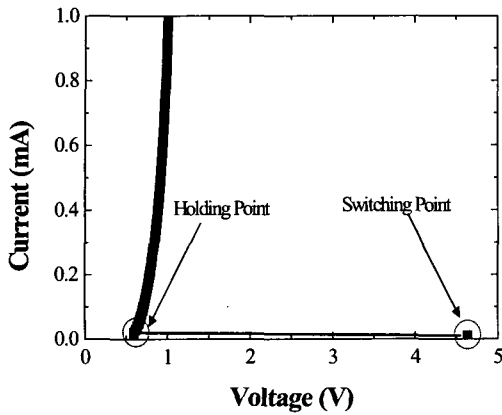


그림 2. 길이 300 μm인 WDOT-LD의 비선형 전류-전압 특성곡선  
 Fig. 2. current-voltage characteristics of waveguide optical thyristor with device length L=300 m.

그림 2는 도파로 구조로 제작된 MQW WDOT-LD의 측정된 비선형 전류-전압 특성 곡선을 보여주고 있다. 광 도파로는 300 μm 길이로 절단하여 공진기 양쪽의 반사율은 0.32로 제작되었으며, 순방향 전압에서는 낮은 전류의 off 상태, 낮은 저항을 갖는 on 상태, 전류가 증가함에 따라 전압이 감소하는 부성 저항 영역의 삼단 상태를 뚜렷하게 보여주고 있다. 이러한 것은 GaAs-based material system에서 제작된 광 싸이리스터와 같은 특성을 보여준다. off 상태에서 스위칭 전압이 4.63 V 인 높은 저항 (high-impedance) 상태를 유지한다. 그 반면에 on 상태에서는 홀딩 전압이 0.59 V로 낮은 저항 (low-impedance) 상태를 보인다. on 상태와 off 상태의 전압의 차이는 약 4 V로 스위칭을 위한 충분한 전압을 준다. 이때의 스위칭 전류와 홀딩 전류는 각각 10 μA, 20 μA 이다. 그림 3은 10~25 °C로 온도를 변화시키에 따라 MQW DOT-LD에서 펄스 입력을 주입하였을 때의 빛의 출력력을 나타낸 그래프이다. 펄스의 주기는 1 ms이고, 펄스의 폭은 1 μs로 하였다. 25 °C의 상온에서는 문턱 전류가 95 mA에서 측정되었으며, 10 °C에서는 71 mA임을 알 수 있다. 그림 4는 입력 신호를 continuous wave로 주입하였을 때 앞에서와 같은 조건으로 실험을 한 결과이다. 상온 (25 °C)에서는 111 mA, 10 °C 에서는 72.5 mA에서 문턱전류가 나타남을 확인하였다. 이 경우에 있어서 문턱 전류밀도는 각각 6166 A/cm<sup>2</sup> 과 4027 A/cm<sup>2</sup> 이다. 비록 문턱 전류 값이 상당히 높지만, 이는 InP로 형성된 장파장용 WDOT에서는 최초의 레이징 특성을 나타낸 결과이다. 본 소자에 있어서 단일 양자우물 구조에 있어서

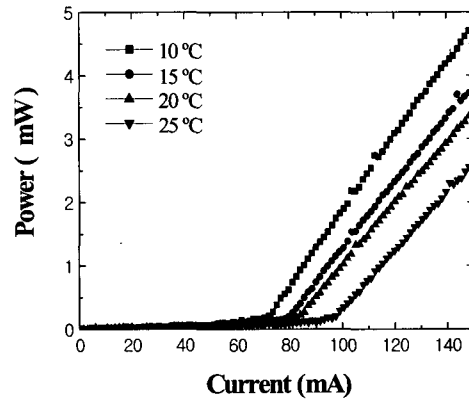


그림 3. 펄스 입력을 인가하였을 때 길이 300 μm인 WDOT-LD의 온도에 따른 전류-광파 특성 곡선  
 Fig. 3. Pulsed light output versus current characteristic curves for the 300 m cavity length WDOT-LD operating at various temperatures.

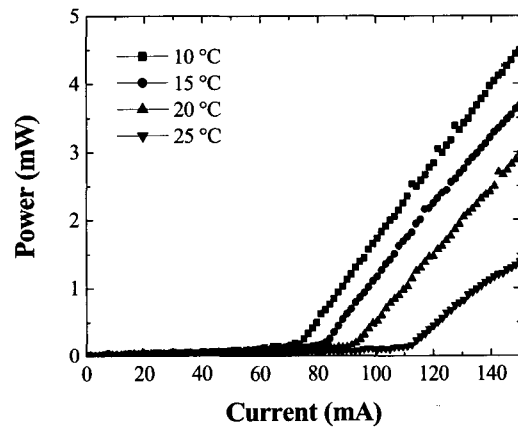


그림 4. CW 입력을 인가하였을 때 길이 300 μm인 WDOT-LD의 온도에 따른 전류-광파 특성 곡선  
 Fig. 4. CW light output versus current characteristic curves for the 300 m cavity length WDOT-LD operating at various temperatures.

의 최적화와 도파로의 폭을 줄여 준다던가, 공진기 양쪽의 반사율을 높여주는 작업 또는 식각의 깊이를 보다 깊게 하면, 50 mA 혹은 그 이하로도 문턱 전류를 낮출 수 있을 것으로 확신한다. 그림 5는 WDOT-LD에서 광 출력의 스펙트럼을 분석한 그래프이다. 주입된 전류의 양은 문턱 전류의 1.41 배에 해당하는 값을 동작점으로 하여 CW 전류를 주입하였다. 이때 방사되는 피크 파장 (λ<sub>p</sub>)은 1.561 μm로 나타났다. 피크 파장간의 파장 간격 (Δλ)은 1.28 nm로 도파로의 길이가 300 μm인 WDOT-LD에서 Fabry-Perot LD와 동일한 결과이다.

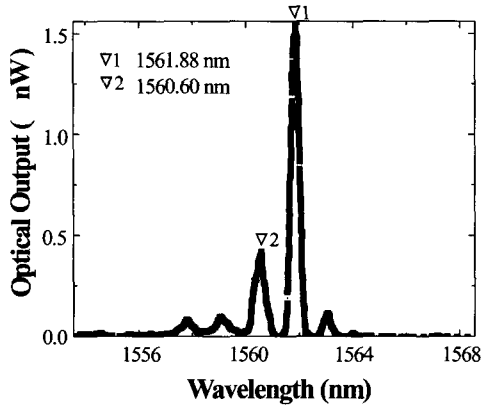


그림 5. 문턱 전류 1.41배의 동작 전류에서 WDOT-LD의 파장 스펙트럼(피크파장( $\lambda_p$ )은 1561nm, 파장 간격( $\Delta\lambda$ )은 1.28nm)

Fig. 5. Spectral output of WDOT-LD with a bias current 1.41 times threshold. The peak wavelength of emission ( $\lambda_p$ ) is at 1561 m. The separation between adjacent peaks ( $\Delta\lambda$ ) is about 1.28 nm

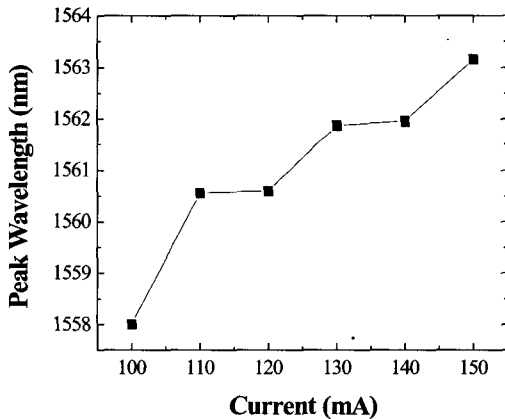


그림 6. 주입된 전류에 따른 피크 파장( $\lambda_p$ )의 이동  
Fig. 6. Peak wavelength shift at various current levels.

그림 6은 WDOT-LD에서 주입된 전류의 변화에 따른 피크 파장( $\lambda_p$ )의 이동 현상을 나타낸 그래프이다. 몇몇 전류 값에 따라 1.558  $\mu\text{m}$ 에서 1.563  $\mu\text{m}$ 로 이동함을 볼 수 있다. 여기서 전류가 증가함에 따라 피크 파장은 장파장으로 이동하는 현상을 보인다. 유효 밴드 에지(effective band edge)는 전자와 무거운 정공으로 구성된 서브 밴드 에너지에 의해서 정의되어질 수 있는데, 그 파장의 이동은 외부에서 가해진 전기장의 세기가 증가됨에 따라 서브 밴드 에너지 차의 감소에 의해 일어난다. 여기서 전기장의 세기는 전류가 증가함에 따라 pn 접합이 제로 전계 조건(zero field

condition)에 비하여 전류가 흐를 때 증가한다.<sup>[10]</sup>

### V. Conclusion

본 논문에서는 장거리 통신용 광통신에서 논리소자로 사용되어질 수 있는 InGaAs/InGaAsP MQW WDOT-LD를 설계 제작하여 최초로 레이징 특성을 측정 분석하였다. 제작된 MQW WDOT-LD의 문턱전류는 상온 (25°C)에서 111 mA, 10 °C의 온도에서는 72.5 mA에서 나타남을 확인하였으며, 이는 최적화된 작업을 통하여 문턱 전류를 50 mA 혹은 그 이하로 낮출 수 있음을 살펴보았다. 스위칭 전압과 홀딩 전압은 4.63 V와 0.59 V 이고, 스위칭 전류와 홀딩 전류는 각각 10  $\mu\text{A}$ , 20  $\mu\text{A}$ 로 나타났다. 문턱 전류의 1.41 배에 해당하는 동작 전류에서 1.561  $\mu\text{m}$ 의 파장에서 레이징 특성을 나타남을 측정하였다. 레이징 특성에서 나타나는 짧은 재결합 시간에서 우리는 보다 향상된 스위칭 타임을 기대할 수 있다. 이는 보다 고속에서 동작하는 광스위칭 소자를 제작할 수 있는 기틀을 마련한 것이라 할 수 있다. 또한, 실험적으로 얻어진 장파장용 DOT의 비선형적 특성은 일정한 진폭을 유지 시켜주는 광 하드 리미터, CDMA 혹은 ATM 헤더 프로세싱을 위한 광 ATM 패킷 스위칭, WDM 광전송 시스템에서 파장 라우팅을 위한 파장 변환기, 등의 많은 광통신 응용 분야에 적용할 수 있다.

### 참 고 문 헌

- [1] K. Matsuda, H. Adachi, T. Chino, and J. Shibata, IEEE Electron Device Lett., vol. 11, pp. 442, 1990.
- [2] P. A. Ewaldsson, G. W. Taylor, P. W. Cooke, S. K. Sargood, P. A. Kiely, and D. P. Docter, IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 5, pp. 634, 1994.
- [3] C. W. Wilmsen, F. R. Beyette, Jr, X. An, S. A. Feld, and K. M. Geib, IEEE Quantum Electronics, vol. 29, pp. 769, 1993.
- [4] J. Swoger and J. G. Simmons, IEEE Trans. Electron Device, vol. 40, pp. 107, 1993.
- [5] M. Kuijk, P. L. Heremans, G. Borghs, and R. Vounckx, Appl. Phys. Lett., vol. 64, pp. 2073, 1994.
- [6] D. G. Kim, J. J. Lee, Y. W. Choi, S. Lee, D. H. Woo, B. K. Kang, and S. H. Kim, Electron. Lett, vol. 36,

pp. 348, 2000.

- [7] J. H. Swoger, C. Qiu, J. G. Simmons, D. A. Thompson, F. Shepherd, D. Beckett, and M. Cleroux, IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 6, pp. 927, 1994.
- [8] D. G. Kim, J. J. Lee, Y. W. Choi, S. Lee, B. K. Kang, S. H. Kim, N. Futakuchi, and Y. Nakano, IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 12, pp. 1219, 2000.
- [9] J. J. Lee, D. G. Kim, J. K. Choi, Y. W. Choi, S. Y. Han, S. Lee, S. H. Kim, Y. Nakano, and N. Futakuchi, in Proc. SPIE, 3944, 926, 2000.
- [10] G. W. Taylor, P. R. Claisse, D. P. Doctor, and P. W. Cooke, IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 4, pp. 823, 1992.

---

저 자 소 개

---



최 운 경(학생회원)

2002년 중앙대학교 전자전기공학부(공학사). 2004년 중앙대학교 전자전기공학부(공학석사). 2004년 3월~현재 : 중앙대학교 전자전기공학부 박사과정 재학중. <주관심분야: 광스위칭

시스템 및 소자, Optical Interconnection>



이 석(정회원)

1994년 연세대학교 물리학과(이학박사). 1995년~현재 : 한국과학기술연구원 광기술연구센터 책임연구원. 관심분야 : 물리학, 정보전자.



김 두 근(정회원)

1998년 중앙대학교 전자공학과(공학사). 2000년 중앙대학교 전자공학과(공학석사). 2003년 중앙대학교 전자공학과(공학박사). 2003년~현재 : 산타바바라 캘리포니아주립대(UCSB),

연구원. <주관심분야: 광스위칭 시스템 및 소자, Optical Interconnection>



우 덕 하(정회원)

1985년 서울대학교 물리학과(이학사). 1987년 서울대학교 물리학과(이학석사). 1992년 서울대학교 물리학과(이학박사). 1993년~현재 한국과학기술연구원 광기술연구센터 책임연구원

<주관심분야 : III-V 화합물 반도체 결정 성장, 광전 소자, 전광통신>



최 영 완(정회원)

1985년 서강대학교 전자공학과(공학사). 1987년 버팔로 뉴욕주립대(SUNY at Buffalo), 전기 및 컴퓨터공학과(공학석사). 1992년 버팔로 뉴욕주립대(SUNY at Buffalo), 전기 및 컴

퓨터공학과(공학박사). 1992년~1995년 한국전자통신연구원(ETRI), 선임연구원. 1995년 ~ 현재 중앙대학교 전자공학과 교수. <주관심분야 : Microwave- Photonics, Optical interconnection, 광스위칭 시스템 및 소자>



김 선 호(정회원)

1983년 한국과학기술원 물리학과(이학박사). 1984년 ~ 현재 : 한국과학기술연구원 광기술연구센터 책임연구원. 관심분야 : 물리학, 전기, 전자, 지능제어, 동영상, 광변조, 응용물리.