

966nm 근적외선 레이저를 이용한 고저항성 바나듐 이산화물 박막 기반 2단자 평면형 소자에서의 양방향 전류 트리거링

(Bidirectional Current Triggering in Two-Terminal Planar Device Based on Highly Resistive Vanadium Dioxide Thin Film Using 966nm Near Infrared Laser)

김지훈* · 이용욱**

(Jihoon Kim · Yong Wook Lee)

Abstract

By incorporating a 966nm near infrared laser, we demonstrated bidirectional current triggering of between 0 and 10mA in a two-terminal planar device based on a highly resistive vanadium dioxide (VO_2) thin film grown by a pulsed laser deposition method. A two-terminal planar device, which had an electrode separation of 100 μm and a 50 μm -wide VO_2 conducting layer, was fabricated through ion beam-assisted milling and photolithographic techniques. A bias voltage range for stable bidirectional current triggering was determined by investigating the current-voltage curves of the VO_2 -based device in a current-controlled mode. Bidirectional current triggering of up to 10mA was realized by directly illuminating the VO_2 film with a focused infrared laser beam, and the transient responses of triggered currents were analyzed when the laser was modulated at various pulse widths and repetition rates. A switching contrast between off- and on-state currents was evaluated as ~ 3571 , and the rising and falling times were measured as ~ 40 and ~ 20 ms, respectively.

Key Words : Vanadium Dioxide, Thin Film, Metal-Insulator Transition, Photothermal Effect, Switching

1. 서 론

금속과 절연체 간 상전이(phase transition)를 통해 독특한 전기적 특성을 보이는 바나듐 이산화물(vanadium dioxide: 이하 VO_2) 박막(thin film)은 새로운 스위칭(switching) 소자를 위한 후보 물질로서 수십 년에 걸쳐 끊임없는 관심을 받아오고 있다. VO_2 박막에서의 상전이 현상은 온도[1], 압력[2], 빛[3] 등의 외부 자극에 의해 유도될 수 있음이 널리 알려져 있다. 또한 VO_2 박막에 전극을 형성하여 2단자 소자로 제작

* Main author : Pukyong National University,
School of Electrical Engineering
** Corresponding author : Pukyong National
University, School of Electrical Engineering,
Associate Professor; Pukyong National
University, Interdisciplinary Program of
Biomedical Mechanical & Electrical Engineering,
Associate Professor
Tel : 051-629-6323, Fax : 051-629-6305
E-mail : yongwook@pknu.ac.kr
Received : 2015. 6. 19
Accepted : 2015. 9. 30

한 뒤 전기장을 인가하면 전계유도(electric-field-induced) 상전이를 일으킬 수 있고[4], 이러한 전계유도 상전이는 소자의 전류-전압 특성에서 부정 미분 저항(negative differential resistance: 이하 NDR) 영역을 발생시킨다[5]. 그리고 이러한 NDR은 전계유도 상전이 발생 시 소자에 흐르는 전류가 급격히 증가하도록 만든다. 현재까지 상기 언급된 여러 자극 요소에 의한 VO₂ 박막의 상전이 가능성을 이용하여 스위칭 소자에 대한 다양한 연구가 이루어져 왔다[4-6]. 특히 강한 비선형성을 갖는 VO₂ 박막 기반 소자의 전류-전압 특성은 빛과의 상호작용을 통해서 일시적[6-8] 또는 영구적[9]으로 변화될 수 있다. 예로서 2단자 VO₂ 박막 소자의 박막부에 적외선 레이저(infrared laser)를 조사(illumination)하고, 조사되는 광 파워를 조절하여 소자에 상전이가 일어나는 문턱(threshold) 전압을 변화시키는 광 게이팅(optical gating)에 대한 연구들이 보고되었다[6-8]. 2014년에는 1550nm 레이저 다이오드(laser diode: 이하 LD)를 사용한 양방향 전류 스위칭(bidirectional current switching)이 보고되었다[10]. 여기서 양방향 전류 스위칭이란 LD가 온-상태(on-state)일 때 소자에 순방향 상전이가, 오프-상태(off-state)일 때는 역방향 상전이가 일어나 전류가 흐르거나 흐르지 않도록 만드는 것을 의미한다. 양방향 전류 스위칭에 사용된 LD는 적절한 바이어스(bias) 전압이 인가된 2단자 VO₂ 소자를 광 게이팅시키는 광원으로 사용되었다. 보고된 연구[10]에서는 최대 10mA의 양방향 전류 스위칭이 가능하였고, 상승 시간(rising time)과 하강 시간(falling time)은 각각 ~192ms와 ~320ms를 달성하였다. 그러나 온 및 오프-상태 간 스위칭 대조비(switching contrast)는 높은 오프-상태 전류로 인해 ~68.2에 지나지 않았으며, 항복(break-over) 전압도 ~10.2V로 낮았다. 최근 발표된 연구[11]에서는 동일한 1550nm LD를 이용하여 최대 15mA의 양방향 전류 스위칭이 가능하였지만, 스위칭 대조비는 ~78.95로 여전히 낮았으며, 상승 및 하강 시간은 각각 더욱 길어진 ~190 및 ~610ms이었다. 따라서 VO₂ 소자가 상용 광 트리거링 싸이리스터(light-triggered thyristor)의 수준에 도달하기 위해서는 스위칭 대조비와 항복 전압, 그리고 응답 속도 등의

여러 성능 지수들이 더욱 향상되어야 한다.

본 논문에서는 펄스 레이저 증착(pulsed laser deposition: 이하 PLD) 기법으로 성장된 고저항성 VO₂ 박막 기반 2단자 평면형 소자에서 966nm 근적외선 LD를 사용하여 양방향 전류 트리거링을 구현하고자 한다. LD에서 출력된 빔(beam)은 빔 집속(focusing) 소자에 의해 집속되어 직접 박막 표면에 조사된다. 우선 제작된 VO₂ 박막 소자의 전류-전압 특성을 전류 제어 모드로 측정하고, 이를 바탕으로 양방향 전류 트리거링을 가능하게 하는 소자의 바이어스 전압 범위를 결정하였다. 다음으로 광-열 유도 상전이(photo-thermally induced phase transition)를 발생시킬 수 있는 최소 펄스 당 에너지(energy per pulse: 이하 EPP)를 구하기 위해, LD에서 출력되는 레이저의 펄스폭(pulse width)을 조절하면서 양방향 트리거링되는 전류의 과도 응답 특성 변화를 조사하였다. 마지막으로 상기 과정으로 도출된 최소 EPP를 이용하여 LD 출력 펄스 반복률(repetition rate)에 따른 전류 과도 응답 특성의 의존성을 시험하였다. 과도 응답 특성 시험 결과 바이어스 전압이 ~3.0V일 때 최대 10mA의 안정적인 양방향 전류 트리거링이 관측되었으며, 이 때 스위칭 대조비는 ~3571로 측정되었다. 고저항성 VO₂ 박막과 이러한 박막을 기반으로 넓은 전극 간격을 갖는 소자를 사용함으로써 소자의 오프-상태 전류를 크게 감소시킬 수 있었고, 결과적으로 높은 스위칭 대조비를 얻을 수 있었다. 또한 과도 응답에서 트리거링되는 전류의 상승 시간과 하강 시간도 각각 ~40ms와 ~20ms로 향상시킬 수 있었다.

2. 실험 구성 및 소자 준비

그림 1 (a)는 중심 파장이 966nm인 근적외선 LD(Lumics, LU0975T100)를 이용하여 2단자 평면형 VO₂ 소자에서 양방향 전류 트리거링을 구현하기 위한 실험 구성도를 보여주고 있다. LD의 최대 출력 파워는 광 파워 미터(Ophir Nova II, 7Z02696)에 의해 ~7.32W로 측정되었으며, 빔 집속기로부터 출력되는 LD의 최대 파워는 ~6.39W로 측정되었다. LD의 출력은 최대 1kHz로 직접 변조가 가능하며, 최소 펄스폭은

500 μ s이다. 그림 1 (b)는 LD의 출력 파워를 ~ 73 mW로 설정하였을 때 광 스펙트럼 분석기(Yokogawa AQ6370C)를 이용하여 LD 출력 스펙트럼을 측정할 결과를 보여주고 있으며, 내부 그림은 실험에 사용된 LD의 실제 모습을 보여주고 있다.

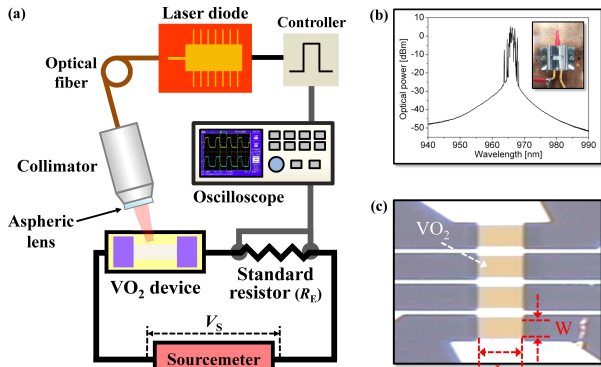


Fig. 1. (a) Experimental setup for bidirectional current triggering in VO₂ device, (b) output spectrum of LD, and (c) microscope image of fabricated VO₂ device

LD 출력광은 광섬유 직진기(Thorlabs F260FC-1550)를 통과한 뒤 광 집속을 위해 집속용 비구면 렌즈(Thorlabs C220TME-B)에 입사된다. 광섬유 직진기에도 별도의 비구면 렌즈가 내장되어 있으며, 내장된 비구면 렌즈의 $1/e^2$ 빔 직경(diameter) 및 빔 발산각(full-angle beam divergence)은 입사광의 파장이 1550nm일 때 각각 ~ 3.0 mm와 $\sim 0.038^\circ$ 이었다. 또한 이 렌즈의 개구수(numerical aperture)와 유효 초점거리(effective focal length)는 각각 0.16과 ~ 5.58 mm이었다. 빔 집속용 비구면 렌즈의 개구수, 유효 구경(clear aperture), 유효 초점거리는 입사광의 파장이 633nm일 때 각각 0.25, 5.5mm, 11.0mm이었다. 상기 집속용 렌즈는 광섬유 직진기의 출력단에 밀착시켜 고정하였으며, 집속 렌즈에서 출력되는 빔은 박막에 수직(90°)으로 입사된다. 상기 집속 렌즈와 직진기가 결합되어 구성되는 빔 집속기의 위치는 3축 이동 스테이지로 세밀하게 조절되며, 박막 표면에서의 빔 직경이 $\sim 365\mu$ m가 되도록 조정하였다. 박막 표면에서의 광 세기(intensity)는 ~ 6.39 W의 레이저 빔이 수직으

로 조사된다고 가정하면 ~ 6107.0 W/cm²로 계산된다.

VO₂ 박막은 PLD 기법으로 사파이어 기판(Al₂O₃ substrate)에 성장시켰으며, 소자의 항복 전압을 증가시키고 오프-상태 전류를 감소시킬 수 있는 고저항성 VO₂ 박막을 제작하기 위해 산소 분압(oxygen atmosphere)과 기판 온도를 정밀하게 조절하여 박막을 제작하였다. 증착된 VO₂ 박막의 평균 두께는 ~ 100 nm로 측정되었다. 2단자 평면형 소자의 제작을 위해, 먼저 제작된 VO₂ 박막을 이온 빔 밀링(ion beam milling) 기법으로 식각하고, 포토리소그래피(photo-lithography) 공정을 통해 Au 및 Ti 전극을 식각된 박막 위에 형성하였다. 그림 1 (c)는 제작된 소자의 광학 현미경 사진을 보여주고 있으며, 각 소자의 전극 간격(L)과 노출된 박막의 폭(W)은 각각 100 μ m와 50 μ m이었다. 그리고 소자에 흐르는 전류의 과도 응답을 측정하기 위해, 그림 1 (a)에 보이는 것과 같이 일반저항 R_E, 직류 바이어스 I_S를 인가하기 위한 소스미터(Keithley 2410), 그리고 VO₂ 소자를 직렬로 연결하여 시험용 폐회로를 구성하였다. 소자에 흐르는 전류는 오실로스코프(Tektronix TDS2022C)를 이용하여 폐회로 내 일반저항에 걸리는 전압을 측정하고, 이를 저항값으로 나누어 측정하였다. 그리고 소자의 전류-전압 특성 측정 시에는 일반저항을 제거하고 소스미터만을 소자에 연결하여 측정을 수행하였다.

3. 실험 결과 및 논의

그림 2는 제작된 VO₂ 소자의 전류-전압 특성을 전류 제어 모드로 측정한 결과를 보여주고 있으며, 청색 원형 기호는 LD를 오프-상태로 했을 때, 적색 사각형 기호는 LD를 온-상태로 했을 때의 전류-전압 곡선을 나타낸다. 측정 시 과전류로 인해 소자가 손상되는 것을 예방하기 위하여, 소자에 흐를 수 있는 제한(compliance) 전류를 10mA로 설정하였다. LD가 온-상태일 때 빔 집속기로부터 출력되는 광 파워는 ~ 6.39 W이었다. 또한 그림 3에 나타난 것처럼 LD가 오프-상태일 때는 박막의 높은 저항과 넓은 전극 간격으로 인해 I_S를 220V까지 증가시켜도 급격한 전류

변화는 관측되지 않았다. 따라서 소자 전류가 급격히 증가하는 문턱 전압 즉, 소자의 항복 전압은 220V 보다 클 것으로 예상된다. 만약 V_S 가 지속적으로 증가하여 소자의 문턱 전압을 초과하면 전계유도 상전이가 발생되어 소자에 흐르는 전류는 급격하게 제한 전류까지 증가할 것이다. 그러나 이 경우 V_S 가 매우 높기 때문에 전류가 제한되더라도 상전이 발생 순간 소자가 쉽게 파괴될 수 있다. 반면 소자를 가열하여 소자의 온도를 상승시키면 문턱 전압이 크게 감소하기 때문에, 전계유도 상전이가 일어날 경우에도 소자의 파괴를 막을 수 있다[12].

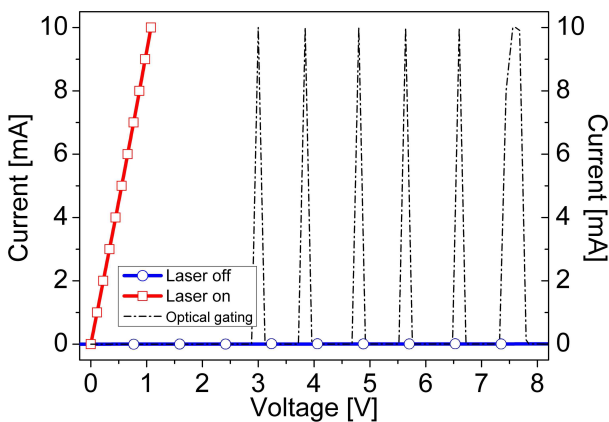


Fig. 2. I-V characteristics of VO₂ device, measured in current-controlled mode with LD switched on or off

VO₂ 소자의 박막부를 레이저로 조사할 경우 광-열 유도 상전이에 의해 절연체 상태의 VO₂ 박막이 금속 성으로 바뀌면서 소자 저항이 크게 감소하고, 이와 동시에 소자에 흐르는 전류는 낮은 V_S 에서도 급격히 증가하게 된다. VO₂의 밴드 갭(band gap) 에너지보다 큰 에너지를 갖는 파장 대역의 빛을 이용한 광 유도 상전이(photo-induced phase transition)에서 빛의 파워가 낮을 경우에는 주로 광 여기(photo excitation) 효과에 의해 박막 내 전도성 캐리어(conduction carrier)가 증가된다. 그러나 빛의 파워가 50mW 이상으로 증가되면 주로 광-열 효과에 의해 온도가 증가되어 VO₂ 박막에 상전이가 발생되면서 전도성 캐리어가 증가된다[13].

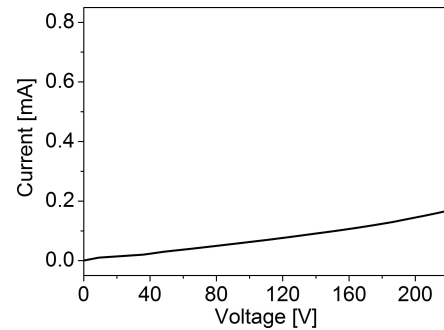


Fig. 3. I-V property of VO₂ device, measured at compliance voltage of 220V without laser excitation

상기 언급된 광-열 유도 상전이는 소자에 조사되는 LD를 켜거나 끄으로써 가역적으로 발생되도록 할 수 있으며, 이러한 광-열 유도 상전이를 이용하여 LD 조사 유무에 따라 소자의 온도가 VO₂의 상전이 온도 (~68°C) 이상 또는 이하가 되도록 만들 수 있다. 따라서 높은 스위칭 대조비를 얻기 위해서는 LD가 조사되지 않는 구간에서 소자의 온도가 상온에 가깝게 유지되어야 한다. 이를 위해 소자의 온도에 영향을 주는 LD의 평균 파워(average power)를 적절히 유지해야 하는데, LD의 평균 파워는 펄스폭, 침투 파워(peak power), 반복률의 곱으로 결정된다. 따라서 일정한 평균 파워에 대해 펄스폭, 침투 파워, 반복률 간에 균형점(trade-off)이 존재하므로 적절한 평균 파워 유지를 위해서는 상기 세 개의 LD 변수들이 서로 균형을 이루어야 한다. 그림 2에서 흑색 단속 점선으로 표시된 부분은 V_S 를 2.8V에서 8.2V까지 증가시키면서 동시에 LD를 무작위로 여섯 번 점멸시키며 측정한 전류 트리거링 결과를 보여주고 있다. 여기서의 전압 증가는 ~10초 동안에 이루어졌고, LD의 점멸 스위칭 간격은 ~1초로 설정되었다. 측정 결과를 통해 최대 10mA의 양방향 전류 트리거링이 상기 V_S 범위에서 가능하다는 것을 확인하였다.

그림 4 (a), 4 (b), 4 (c), 4 (d)는 ~6.39W의 침투 파워와 1.0Hz의 고정된 반복률을 갖고 소자에 조사되는 레이저 펄스의 온-상태 펄스폭이 각각 50, 70, 100, 200ms일 때 소자에 흐르는 전류의 과도 응답을 보여주고 있다. 과도 응답 특성 측정은 그림 1에서 제시된

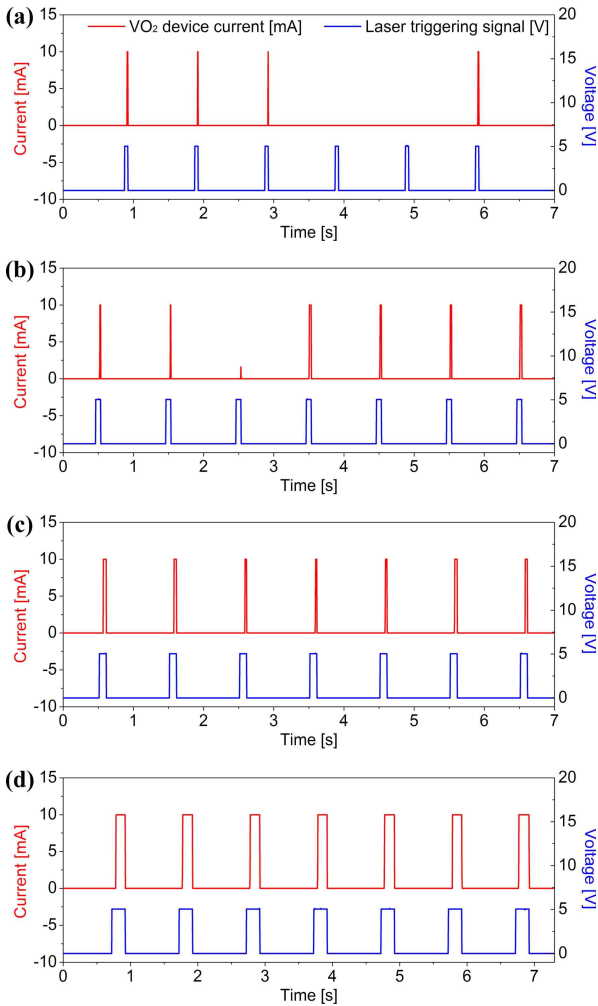


Fig. 4. Transient responses of current flowing through laser-triggered device, when on-state pulse widths are (a) 50, (b) 70, (c) 100, and (d) 200ms

시험용 패회로를 이용하여 수행되었으며, R_E 와 V_S 는 각각 100Ω과 ~3.0V이었고, 제한 전류는 10mA로 설정되었다. 그림 4 (a)와 4 (b)에서 확인할 수 있듯이 온-상태 펄스폭이 100ms 미만일 때에는 전류 트리거링 동작이 불안정하고 불규칙적으로 일어나는 것을 알 수 있었다. 반면 펄스폭이 100ms 이상인 경우에는 그림 4 (c) 및 4 (d)와 같이 안정적인 트리거링이 일어나는 것을 확인하였다. 이러한 결과로부터, 레이저 트리거링 시 광-열 유도 상전이를 발생시킬 수 있는 최소 EPP는 침투 파워(~305.3mW)와 펄스폭(100ms)을 곱

하여 ~30.5mJ로 결정되었다. 여기서 LD 출력 펄스의 침투 파워는 LD의 광 세기(~6107.0W/cm²)와 노출된 VO₂ 박막의 면적(5×10⁻⁵cm²)을 이용하여 박막에만 전달되는 파워를 구한 것이다. 상기 최소 EPP는 1.0Hz 반복률에서 계산되었지만, 단일 펄스 실험에서도 동일한 최소 EPP를 얻을 수 있었다. 즉 펄스폭이 100ms 미만인 경우라면 광-열 유도 상전이를 발생시킬 수 있는 최소 EPP가 소자의 박막에 전달되지 않는다. 그러나 LD 출력 빔 집속부의 개선을 통해 박막 표면에 집속되는 빔의 직경을 더욱 감소시킬 수 있다면, 100ms 이하의 펄스들에 대해서도 안정적인 트리거링 동작을 기대할 수 있을 것이다.

또한 다양한 펄스 반복률에서 양방향 전류 트리거링의 특성 변화를 조사하기 위해, 박막에 조사되는 LD의 최소 EPP를 만족시킨 상태에서 펄스 반복률을 변화시켜가며 트리거링되는 전류의 과도 응답 변화를 측정하였다. 최소 EPP를 만족시키기 위하여 빔 집속기에서 출력되는 펄스의 파워와 펄스폭을 ~6.39W와 100ms로 조절하였고, 펄스 반복률은 0.1, 0.5, 1.0, 2.0Hz의 네 주파수로 설정하였다. 그림 5 (a), 5 (b), 5 (c), 5 (d)는 LD 출력 펄스 반복률이 각각 0.1, 0.5, 1.0, 2.0Hz인 경우 트리거링되는 전류의 과도 응답 변화를 보여주고 있다. 그림 5에서도 이전 실험과 동일한 시험용 패회로가 사용되었으며, R_E 와 V_S 는 각각 100Ω과 ~3.0V이었고, 제한 전류도 10mA로 설정되었다.

그림 5에서 알 수 있듯이 다양한 반복률에서 최대 10mA까지의 안정적인 양방향 전류 트리거링이 가능하였다. 오프-상태 전류는 ~2.8μA이었고, 평균 스위칭 대조비는 ~3571로 계산되었다. 표 1은 이전 연구 [10]와 본 연구의 결과를 비교한 것으로, 스위칭 대조비는 이전에 비해 ~50배 이상 향상되었다. 이는 고저항성 VO₂ 박막의 사용과 소자의 넓은 전극 간격으로 인해 오프-상태 전류를 낮추고, 966nm 근적외선 레이저의 광-열 효과를 통해 고저항성 VO₂ 박막의 상전이를 유도할 수 있었기 때문으로 사료된다. 특히 스위칭 시간과 관련하여 상승 시간은 펄스 반복률에 관계없이 ~40ms로 측정되었고, 하강 시간은 상승 시간보다 짧은 ~20ms로 측정되었으나 반복률에 대한 의존성을 약간 보였다. 하강 시간이 상승 시간보다 짧은 이

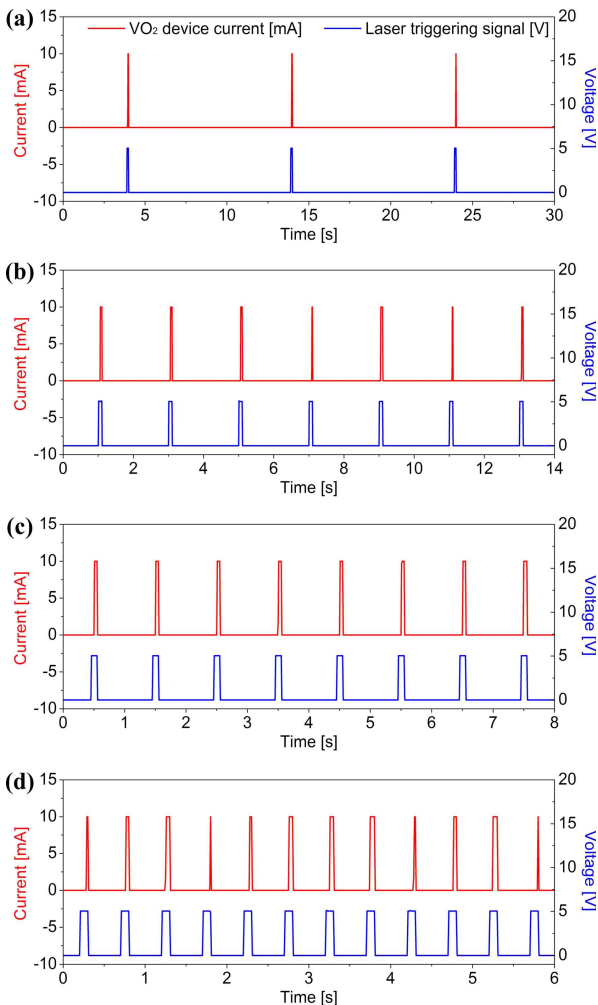


Fig. 5. Transient responses of current flowing through VO₂ device, when repetition rates of LD pulses are (a) 0.1, (b) 0.5, (c) 1.0, and (d) 2.0Hz

Table 1. Bidirectional current triggering characteristics comparison between previous and proposed studies

항 목	이전 연구	본 연구
바이어스 전압	2.76	3.0
오프-상태 전류(μA)	~146.6	~2.8
온-상태 전류(mA)	10	10
스위칭 대조비	~68.2	~3571
평균 상승 시간(ms)	~192	~40
평균 하강 시간(ms)	~320	~20

유는 박막이 성장된 기판이 VO₂ 박막에 비해 상대적으로 커서 빠르게 열을 식힐 수 있었기 때문에 사료된다. 또한 측정된 스위칭 시간은 실험에 사용된 측정 장비의 최소 데이터 수집 시간 간격과 비슷하기 때문에, 실제 스위칭 시간은 측정된 것 보다 더 빠를 것으로 예상된다.

4. 결 론

본 논문에서는 고저항성 VO₂ 박막 기반 2단자 소자에 966nm의 근적외선 LD를 조사하고, LD의 점멸 스위칭에 따라 VO₂ 박막에서 광-열 유도 상전이를 발생시키거나 소멸시킬 수 있는 양방향 전류 트리거링을 구현하였다. VO₂ 소자의 전류 제어 모드 전류-전압 특성으로부터 결정된 바이어스 전압 범위를 고려하여 시험용 폐회로에서 ~3.0V의 바이어스 전압을 인가하고, ~6.39W의 레이저 펄스를 박막에 조사함으로써, 최대 10mA까지 양방향 전류 스위칭을 구현하였으며 ~3571의 스위칭 대조비를 얻을 수 있었다. 특히 트리거링된 전류의 과도 응답 분석을 통해 광-열 유도 상전이를 발생시킬 수 있는 최소 EPP를 ~30.5mJ로 결정할 수 있었다. 또한 최소 EPP를 만족시키는 펄스폭을 유지한 상태에서 다양한 펄스 반복률에 대해 양방향 전류 트리거링을 구현하였고, 상승 및 하강 스위칭 시간은 각각 ~40ms와 ~20ms이었다. 966nm 근적외선 LD를 사용하여 높은 스위칭 대조비와 빠른 스위칭 시간을 구현한 본 연구 결과는 향후 산화물 기반 상전이 소자에 대한 관심을 높일 수 있을 것으로 예상된다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임.
(No. 2013R1A2A2A01068390)

References

- [1] F. J. Morin, "Oxides which show a metal-insulator transition at the Neel temperature," *Physical Review Letters*, vol. 3, pp. 34-36, 1959.

[2] E. Arcangeletti, L. Baldassarre, D. D. Castro, S. Lupi, L. Malavasi, C. Marini, A. Perucchi, and P. Postorino, "Evidence of a pressure-induced metallization process in monoclinic VO₂," *Physical Review Letters*, vol. 98, pp. 196406(1-4), 2007.

[3] A. Cavalleri, Cs. Tóth, C. W. Siders, J. A. Squier, F. Ráksi, P. Forget, and J. C. Kieffer, "Femtosecond structural dynamics in VO₂ during an ultrafast solid-solid phase transition," *Physical Review Letters*, vol. 87, pp. 237401(1-4), 2001.

[4] Y. W. Lee, B.-J. Kim, J.-W. Lim, S. J. Yun, S. Choi, B.-G. Chae, G. Kim, and H.-T. Kim, "Metal-insulator transition-induced electrical oscillation in vanadium dioxide thin film," *Applied Physics Letters*, vol. 92, pp. 162903(1-3), 2008.

[5] B. K. Ridley and T. B. Watkins, "The possibility of negative resistance effects in semiconductors," *Proceedings of the Physical Society of London*, vol. 78, pp. 293-304, 1961.

[6] Y. W. Lee, B.-J. Kim, S. Choi, H.-T. Kim, and G. Kim, "Photo-assisted electrical gating in a two-terminal device based on vanadium dioxide thin film," *Optics Express*, vol. 15, pp. 12108-12113, 2007.

[7] Y. W. Lee, B.-J. Kim, S. Choi, Y. W. Lee, and H.-T. Kim, "Enhanced photo-assisted electrical gating in vanadium dioxide based on saturation-induced gain modulation of erbium-doped fiber amplifier," *Optics Express*, vol. 17, pp. 19605-19610, 2009.

[8] Y. W. Lee, E.-S. Kim, B.-S. Shin, and S.-M. Lee, "High-performance optical gating in junction device based on vanadium dioxide thin film grown by sol-gel method," *KIEE Journal of Electrical Engineering and Technology*, vol. 7, pp. 784-788, 2012.

[9] C. Ko and S. Ramanathan, "Effect of ultraviolet irradiation on electrical resistance and phase transition characteristics of thin film vanadium oxide," *Journal of Applied Physics*, vol. 103, pp. 106104(1-3), 2008.

[10] B.-J. Kim, G. Seo, and Y. W. Lee, "Bidirectional laser triggering of planar device based on vanadium dioxide thin film," *Optics Express*, vol. 22, pp. 9016-9023, 2014.

[11] Y. W. Lee, "Bidirectional current triggering in two-terminal planar device based on vanadium dioxide thin film using 1550nm laser diode," *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, vol. 29, pp. 11-17, 2015.

[12] H.-T. Kim, B.-G. Chae, D.-H. Youn, S.-L. Maeng, G. Kim, K.-Y. Kang, and Y.-S. Lim, "Mechanism and observation of Mott transition in VO₂-based two- and three-terminal devices," *New Journal of Physics*, vol. 6, pp. 52(1-19), 2004.

[13] G. Seo, B.-J. Kim, Y. W. Lee, and H.-T. Kim, "Photo-assisted bistable switching using Mott transition in two-terminal VO₂ device," *Applied Physics Letters*, vol. 100, pp. 011908(1-3), 2012.

◆ 저자소개 ◆



김지훈 (金志勳)

1989년 11월 2일생. 2013년 8월 부경대학교 전기공학과 졸업. 2015년 8월 부경대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 부경대학교 전기공학과 대학원 재학(박사과정).



이용욱 (李鎔旭)

1975년 4월 25일생. 1998년 서울대학교 전기컴퓨터공학부 졸업. 2000년 서울대학교 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(석사). 2004년 서울대학교 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(박사). 현재 부경대학교 전기공학과 부교수.