

이산화탄소 레이저를 이용한 바나듐 이산화물 박막 전자 소자에서의 전류 스위칭에 관한 연구

(Study on Current Switching in Electronic Devices Based on Vanadium Dioxide Thin Films Using CO₂ Laser)

김지훈* · 이용욱**

(Jihoon Kim · Yong Wook Lee)

Abstract

With a collimated CO₂ laser beam, the bidirectional current switching was realized in a two-terminal electronic device based on a highly resistive vanadium dioxide(VO₂) thin film. A VO₂ thin film was grown on a Al₂O₃ substrate by a pulsed laser deposition method. For the fabrication of a two-terminal electronic device, the VO₂ thin film was etched by an ion beam-assisted milling method, and the VO₂ device, of which VO₂ patch width and electrode separation were 50 and 100μm, respectively, was fabricated through a photolithographic method. A bias voltage range for stable bidirectional current switching was found by using the current-voltage property of the device measured in a current-controlled mode. The transient responses of bidirectionally switched currents were analyzed when the laser was modulated at a variety of pulse widths and repetition rates. A switching contrast was measured as ~3333, and rising and falling times were measured as ~39 and ~21ms, respectively.

Key Words : Vanadium dioxide, Thin film, Metal-insulator transition, Switching, CO₂ laser

1. 서 론

바나듐 이산화물(vanadium dioxide: 이하 VO₂)은 임계 온도(~68℃)를 기준으로 금속 및 절연체 상태 간의 가역적인 구조 상전이(structural phase transition) 특성을 보이는 물질로서 이러한 상전이 특성을 이용한 새로운 전자 및 광학 소자들에 대한 연구가 꾸준히 시도되어 왔다[1-5]. 일반적으로 VO₂의 상전이는 온도 이외에도 압력[6] 또는 빛[7] 등의 외부 자극으로 발생시킬 수 있다. 특히 VO₂를 박막 형태로 제작하고, 박막에 전극을 형성하여 2단자 소

* 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. 17.
Accepted : 2015. 11. 9.

자를 제작할 경우, 전기장을 인가하여 전계유도 (electric-field-induced) 상전이를 구현할 수 있다. 이러한 전계유도 상전이는 VO_2 의 부정 미분 저항 (negative differential resistance) 특성에 의해 일정한 소자 인가 전압 이상에서 급격한 소자 전류의 증가를 가져온다[2]. 급격한 전류의 증가를 보이는 이러한 비선형성이 높은 전류-전압 특성은 VO_2 소자의 스위칭 소자 응용성을 높여주며, PN 접합(junction) 기반의 기존 스위칭 소자와는 달리 VO_2 박막 단일 층(single layer)으로 새로운 구조의 스위칭 소자를 구현할 수 있는 가능성을 제시한다.

이러한 2단자 VO_2 소자의 외부 게이팅(external gating)을 위해 광 보조 게이팅(photo-assisted electrical gating) 기법이 2007년도에 제안되었고, VO_2 박막에 조사(illumination)되는 레이저(laser)의 광 파워를 제어함으로써 전계유도 상전이를 발생시키는 문턱 전압(threshold voltage)을 조절하는 것이 가능하였다[3,8,9]. 2014년에는 1550nm 파장의 적외선 레이저 다이오드(infrared laser diode)를 여기(excitation) 광원으로 사용하여 양방향 전류 스위칭(bidirectional current switching)을 구현한 결과가 보고되었다[10]. 여기서 양방향 전류 스위칭은 레이저가 온-상태(on-state) 일 때 소자에 순방향 상전이(절연체 상태에서 금속성 상태로의 상전이)를 일으켜 소자에 흐르는 전류를 증가시키고, 오프-상태(off-state) 일 때는 역방향 상전이(금속성 상태에서 절연체 상태로의 상전이)를 일으켜 소자에 흐르는 전류를 최소로 만드는 소자 통전 전류 스위칭을 의미한다. 기존 연구 [10]에서 광 조사에 사용된 레이저 다이오드는 2단자 VO_2 소자에서 마치 트랜지스터(transistor)의 게이트 단자(gate terminal)와 같은 기능을 하는 광 게이팅 역할을 수행하였고, 최대 10mA까지의 전류에 대해 양방향 스위칭을 구현하였으며, 상승 및 하강 시간은 각각 ~192와 ~320ms이었다. 그러나 온 및 오프-상태 전류 간 스위칭 대조비(switching contrast)는 높은 오프-상태 전류로 인해 ~68.2로 크게 낮았으며, 항복 전압(break-over voltage)도 ~10.2V 정도로 낮은 수준이었다. 최근에는 이전 연구[10]와 유사하게 1550nm 레이저 다이오드를 사용하여 최대 15mA의 양방향 전류

트리거링을 구현한 결과가 보고되었다[11]. 그러나 높은 오프-상태의 전류로 인해 스위칭 대조비는 ~78.95로 낮았으며, 전류의 상승 시간과 하강 시간은 각각 ~190 및 ~610ms이었다. 2단자 VO_2 소자의 양방향 광 게이팅에서 이러한 낮은 스위칭 대조비와 항복 전압, 그리고 느린 응답 속도는 화합물 반도체 기반 광 트리거링 싸이리스터(light-triggered thyristor)와 같이 실제 적용되고 있는 광 게이팅 스위치와 비교할 경우 더욱 향상될 필요가 있다.

본 논문에서는 펄스 레이저 증착(pulsed laser deposition: 이하 PLD) 기법으로 성장된 고저항성 VO_2 박막을 기반으로 하는 2단자 평면형 소자에서, 이산화탄소(CO_2) 레이저를 사용하여 양방향 전류 스위칭을 구현하고자 한다. 이산화탄소 레이저에서 출력된 빔은 빔 집속(beam focusing) 장비를 통해 집속시켜 직접 박막 표면에 조사시켰다. 그리고 양방향 스위칭이 가능한 바이어스(bias) 전압 범위를 제작된 VO_2 박막 기반 소자의 전류-전압 특성으로부터 도출하였다. 다음으로 이산화탄소 레이저의 펄스폭(pulse width)과 반복률(repetition rate)을 다양하게 변화시켜 가면서 이에 따른 양방향 스위칭되는 소자 전류의 과도 응답(transient response) 변화를 조사하였다. 과도 응답 측정 결과, 바이어스 전압이 ~4.6V일 때 최대 10mA의 안정적인 양방향 전류 스위칭이 가능하였고, 스위칭 대조비는 ~3333로 측정되었다. 이러한 높은 스위칭 대조비는 고저항성 VO_2 박막의 사용과 넓은 전극 간격으로 인한 낮은 오프-상태 전류에 기인한다. 또한, 스위칭되는 전류의 상승 시간 및 하강 시간은 각각 ~39와 ~21ms로 측정되었다.

2. 실험 구성 및 소자 준비

그림 1은 출력 파장의 범위가 10.57에서 10.63 μm 인 이산화탄소 레이저를 사용하여 2단자 평면형 VO_2 소자의 양방향 전류 스위칭을 구현하기 위한 실험 구성도를 보여주고 있다. 레이저의 최대 출력 파워는 광 파워 미터(Ophir Nova II)에 의해 ~40.18W로 측정되었다. 레이저의 출력 파워는 5kHz의 캐리어 주파수(carrier frequency)로 펄스폭 변조(modulation)된 구

동 신호를 펄스 듀티 비율(duty ratio)을 조절함으로써 제어되며, 레이저의 실제 출력 시간은 외부 트리거 단자(external trigger port)를 통해 입력되는 함수 발생기(Tektronix AFG3021C)의 TTL 신호와 상기 펄스 폭 변조된 구동 신호와의 곱으로 결정된다. 레이저 출력 펄스의 상승 시간 및 하강 시간은 펄스 반복률이 500Hz이고, 듀티 비율이 50%일 때(펄스폭: 1ms) 각각 ~ 29 와 $\sim 83\mu\text{s}$ 이었다. 본 실험에서는 과도한 레이저 출력 파워로 인해 박막이 손상되는 것을 방지하기 위하여 듀티 비율을 11%로 설정함으로써 레이저의 출력 파워를 $\sim 7.21\text{W}$ 로 제한하였다.

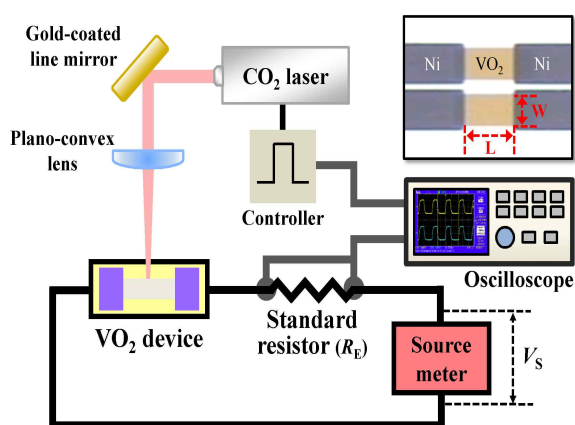


Fig. 1. Experimental setup for bidirectional current switching in two-terminal planar VO_2 device

레이저 출력 빔은 레이저 본체에 내장된 렌즈에 의해 직진화(collimation)되어 진행한다. 이 때 직진화된 레이저 빔의 $1/e^2$ 빔 직경 및 빔 발산각(divergence angle)은 각각 $\sim 2.35\text{mm}$ 와 $\sim 7.0\text{mrad}$ 이었다. 직진화된 레이저 빔은 금 코팅된 선형 거울(line mirror, Thorlabs NB1-L01)에 의해 진행 방향이 바뀌고, 평면-볼록 렌즈(plano-convex lens, Thorlabs LA7660-F)에 의해 집속된다. 평면-볼록 렌즈의 유효 구경(clear aperture) 및 유효 초점거리(focal length)는 입사 파장이 $10.6\mu\text{m}$ 일 때 각각 $\sim 80\%$ 및 $\sim 75.0\text{mm}$ 이었고, 선형 거울의 반사도는 99% 이상이었다. 평면-볼록 렌즈에 의해 집속된 빔은 VO_2 박막에 수직으로 입사되며, 입사된 빔의 파워는 $\sim 6.23\text{W}$ 이었다. VO_2 소자의 위치는 박막 표면에 조사되는 빔의 직경이 $\sim 500\mu\text{m}$ 가 될

수 있도록 3축 이동 스테이지를 이용하여 정밀하게 조절되었다. 이 때 박막 표면에서의 광 세기(intensity)는 $\sim 6.23\text{W}$ 의 광 파워를 갖는 출력 빔이 박막에 수직으로 조사될 때를 가정할 경우 $\sim 3172.9\text{W}/\text{cm}^2$ 로 계산된다.

2단자 평면형 VO_2 소자의 제작을 위해, VO_2 박막은 PLD 기법을 이용하여 사파이어 기판(Al_2O_3 substrate) 위에 증착되었다. 오프-상태 전류를 낮추고 항복 전압을 증가시키기 위해, 고저항성 VO_2 박막은 기판 온도와 PLD 챔버 내의 산소 분압을 정밀하게 조절하여 제작되었다. 증착된 VO_2 박막의 평균 두께는 $\sim 100\text{nm}$ 로 측정되었다. 제작된 VO_2 박막에 이온 빔(ion beam) 식각을 통해 전류 채널(current channel)을 형성한 뒤, 포토리소그래피(photolithography) 공정을 통해 금(Au) 및 니켈(Ni) 전극을 식각된 박막 위에 형성하였다. 그림 1의 내부 그림은 상기 반도체 공정을 통하여 제작된 VO_2 소자의 광학 현미경 사진을 보여주고 있다. 소자의 전극 간격(L)과 전류 채널로 사용되는 VO_2 박막의 폭(W)은 각각 100 및 $50\mu\text{m}$ 이었다. 제작된 소자에서 레이저 트리거링되는 전류의 과도 응답을 측정하기 위해 그림 1에 보이는 것과 같이 소스미터(source meter, Keithley 2410), VO_2 소자, 일반 저항(R_E)으로 이루어진 폐회로를 구성하였다. VO_2 소자는 직류 바이어스 I_S 를 인가하기 위한 소스미터와 일반 저항에 직렬로 연결하였다. 소자에 흐르는 전류는 오실로스코프(Tektronix TDS2022C)를 이용하여 저항에 걸리는 전압을 측정함으로써 시간적인 변화를 관측하였다. 그리고 소자의 전류-전압 특성 측정 시에는 소스미터만을 사용하였다.

3. 실험 결과 및 논의

그림 2는 제작된 VO_2 소자의 전류-전압 특성을 소스미터의 전류 제어 모드를 이용하여 측정한 결과를 보여주고 있으며, 과전류로 인해 소자가 파괴되는 경우를 방지하기 위해 제한(compliance) 전류는 10mA로 설정하였다. 그림 2에서 적색 삼각형 기호는 레이저를 조사하지 않았을 때, 청색 사각형 기호는 레이저를 $\sim 6.23\text{W}$ 로 조사하였을 때의 전류-전압 특성을 나

타난다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 레이저 조사 없이는 소자의 넓은 전극 간격과 박막의 높은 저항으로 인해 V_S 가 220V까지 증가되어도 급격한 저항의 감소 즉, 전류의 증가가 관측되지 않았다. 따라서 소자의 항복 전압은 220V이상일 것이라고 예상할 수 있다. 만약 V_S 가 계속 증가하여 소자의 문턱 전압을 초과하면 전계유도 상전이(photothermally-induced phase transition)가 일어날 수 있는데, 이때는 V_S 가 매우 높기 때문에 제한 전류가 낮더라도 전계유도 상전이 발생 순간 소자가 쉽게 파손될 수 있다.

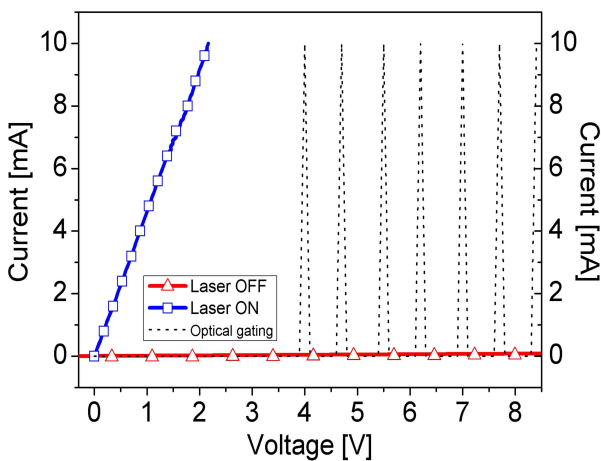


Fig. 2. Variation of I - V characteristics of fabricated VO_2 device, measured in current-controlled mode according to on- or off-state of laser

소자의 박막부에 레이저가 조사되면 광-열 유도 상전이(photo-thermally-induced phase transition)를 통해 VO_2 박막 내의 절연성 VO_2 그레인(grain)이 금속성 VO_2 그레인으로 바뀌기 때문에 V_S 가 낮더라도 쉽게 전계유도 상전이가 일어나 소자 저항의 급격한 감소를 가져올 수 있다. 상기 언급된 광-열 유도 상전이는 소자에 조사되는 레이저를 스위칭함으로써 즉, 켜고 끄으로써 가역적으로 발생되도록 할 수 있으며, 이러한 광-열 유도 상전이를 이용하여 레이저 조사 유무에 따라 소자의 온도가 VO_2 의 임계 온도($\sim 68^\circ C$) 이상 또는 이하가 되도록 만들 수 있다. 따라서 높은 스위칭 대조비를 얻기 위해서는 레이저가 조사되지 않는 동안에는 소자의 온도가 상온에 가깝게 유지되

어야 한다. 펄스 레이저의 평균 파워(average power)는 펄스폭과 침투 파워(peak power)의 곱으로 결정되는 펄스 당 에너지(energy per pulse: 이하 EPP)와 반복률의 곱으로 정의된다. 이러한 평균 파워는 소자의 온도에 영향을 주므로 높은 스위칭 대조비를 얻기 위해서는 EPP와 반복률이 적절한 균형을 이루어야 한다.

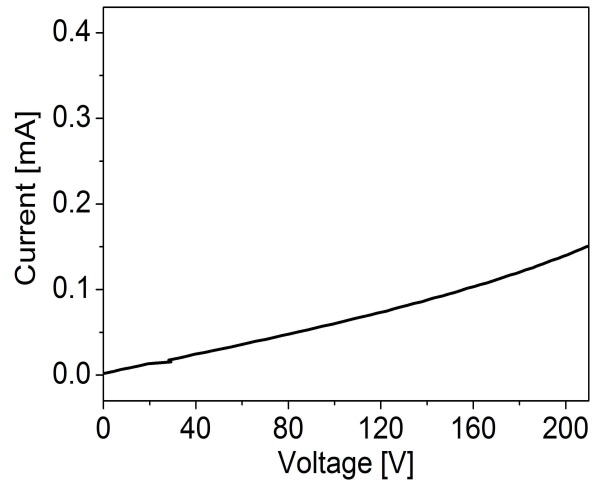


Fig. 3. I - V characteristics of VO_2 device, measured in current-controlled mode without laser illumination

그림 2의 검은 점선으로 표시된 곡선은 바이어스 전압(V_S)을 3.9에서 8.5V까지 증가시키면서 레이저를 임의로 7번 스위칭시키며 측정된 가역적인 전류 스위칭(즉, 양방향 전류 스위칭) 결과를 보여주고 있다. 3.9~8.5V 범위의 전압 스위프(sweep)은 ~ 10 초 동안 수행되었으며, 레이저 펄스 간 간격은 1초 이상이었다. 상기 전압 스위프 구간에서 7번의 양방향 전류 스위칭 결과를 얻을 수 있었고, 최대 10mA의 양방향 전류 스위칭이 상기 범위의 바이어스 전압에서 가능하다는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과로부터 도출된 바이어스 전압 범위를 고려하여, 양방향 전류 스위칭을 구현하기 위한 V_S 를 4.6V로 결정하였다.

그림 4 (a), 4 (b), 4 (c), 4 (d)는 온-상태 펄스폭이 각각 50, 70, 100, 그리고 200ms인 레이저 펄스들이 소자에 조사될 때, 제작된 소자에 흐르는 전류의 과도 응답을 보여주고 있다. 이 때 평면-볼록 렌즈에서 출력

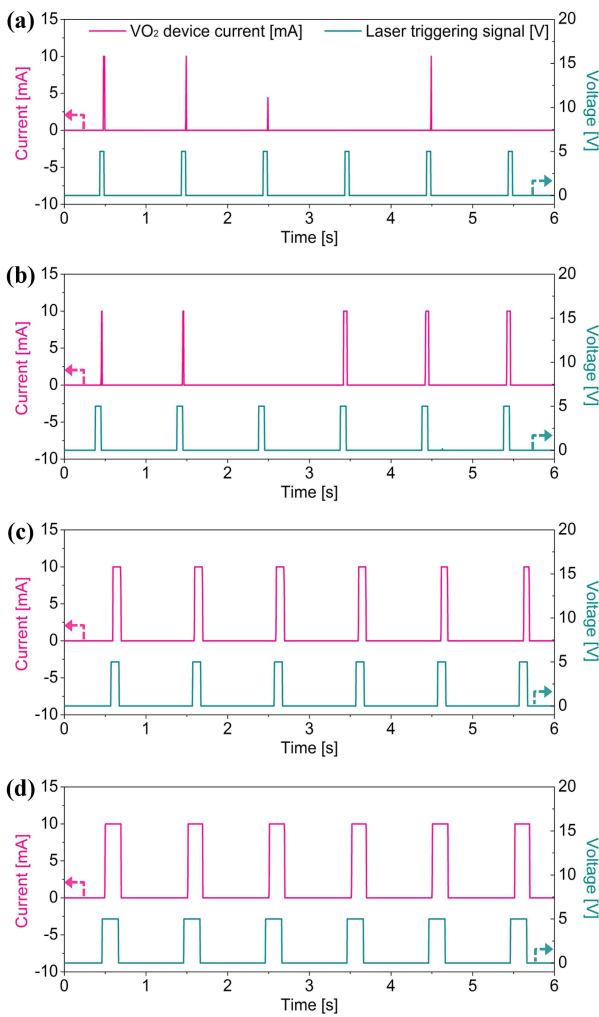


Fig. 4. Transient responses of current flowing through laser-triggered device, when on-state pulse widths are (a) 50, (b) 70, (c) 100, and (d) 200ms

되는 레이저 펄스의 파워는 $\sim 6.23\text{W}$ 이었고, 레이저 펄스의 반복률은 1.0Hz 로 고정시켰다. 이러한 과도 응답 측정은 그림 1에서 제시된 폐회로를 이용하여 수행되었으며, 이 때 R_E 와 V_S 는 각각 100Ω 과 $\sim 4.6\text{V}$ 이었고, 제한 전류는 10mA 로 설정되었다. 그림 4 (a)와 4 (b)에 보이는 것과 같이 온-상태 펄스폭이 100ms 보다 작을 때에는 스위칭 동작이 불안정하고 간헐적으로 일어났다. 그러나 온-상태 펄스폭이 100ms 이상인 경우에는 그림 4 (c)와 4 (d)에서 확인할 수 있듯이 안정

적으로 스위칭 동작이 일어나는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과로부터 양방향 전류 스위칭을 위한 광-열 유도 상전이를 일으킬 수 있는 이산화탄소 레이저의 최소 EPP는 $\sim 15.9\text{mJ}$ 로 결정되었다. 상기 최소 EPP는 레이저의 광 세기($\sim 3172.9\text{W}/\text{cm}^2$)와 레이저 펄스가 조사되는 VO_2 박막의 면적($5 \times 10^{-5}\text{cm}^2$)을 이용하여 박막에 전달되는 첨두 파워($\sim 158.6\text{mW}$)를 구한 뒤, 이 첨두 파워에 펄스폭(100ms)을 곱하여 얻을 수 있다. 이러한 레이저의 최소 EPP는 단일 펄스 실험을 통해서도 동일한 값을 얻을 수 있었다. 만약 박막 표면에 집속된 빔의 직경을 빔 집속 장비의 개선을 통해 더욱 감소시킬 수 있다면, 100ms 보다 작은 펄스폭을 갖는 레이저 펄스에 대해서도 안정적인 스위칭 동작을 기대할 수 있을 것이다.

마지막으로 레이저의 최소 EPP를 만족시킨 상태에서 레이저 펄스 반복률에 따른 양방향 전류 스위칭 동작의 과도 응답 변화를 조사하였다. 상기 최소 EPP를 만족시키기 위해 평면-블록 렌즈에서 출력되는 레이저 펄스의 파워와 펄스폭은 각각 $\sim 6.23\text{W}$ 와 100ms 를 유지시켰다. 그리고 레이저 펄스는 네 종류의 반복률 $0.1, 0.5, 1.0, 2.0\text{Hz}$ 로 변조시켰다. 그림 5 (a), 5 (b), 5 (c), 5 (d)는 그림 4에서 사용한 회로와 동일한 회로 ($R_E=100\Omega, V_S \sim 4.6\text{V}$)에서 펄스 반복률이 각각 $0.1, 0.5, 1.0, 2.0\text{Hz}$ 인 경우 양방향 스위칭되는 소자 전류의 과도 응답 변화를 보여주고 있다. 상기 반복률에 대해 최대 10mA 까지 안정적인 양방향 전류 스위칭이 가능하였으며, 오프-상태 전류는 $\sim 3.0\mu\text{A}$ 이었다. 결과적으로 평균 스위칭 대조비는 ~ 3333 으로 계산되었으며, 이는 표 1에 나타난 것과 같이 이전 연구[10]에 비해 ~ 49 배 높은 값이다.

크게 향상된 스위칭 대조비는 고저항성 VO_2 박막의 사용과 소자의 넓은 전극 간격으로 인해 오프-상태 전류를 낮출 수 있었고, 이산화탄소 레이저의 광-열 효과를 통해 고저항성 VO_2 박막의 상전이를 유도할 수 있었기 때문으로 사료된다. 특히 전류의 상승 시간과 하강 시간은 반복률과 상관없이 각각 ~ 39 와 $\sim 21\text{ms}$ 로 측정되었다. 상승 시간에 비해 하강 시간이 빠른 이유는 소자의 VO_2 박막 규모($L=100\mu\text{m}, W=50\mu\text{m},$ 두께= 100nm)에 비하여 VO_2 박막이 증착된 사파이어 기

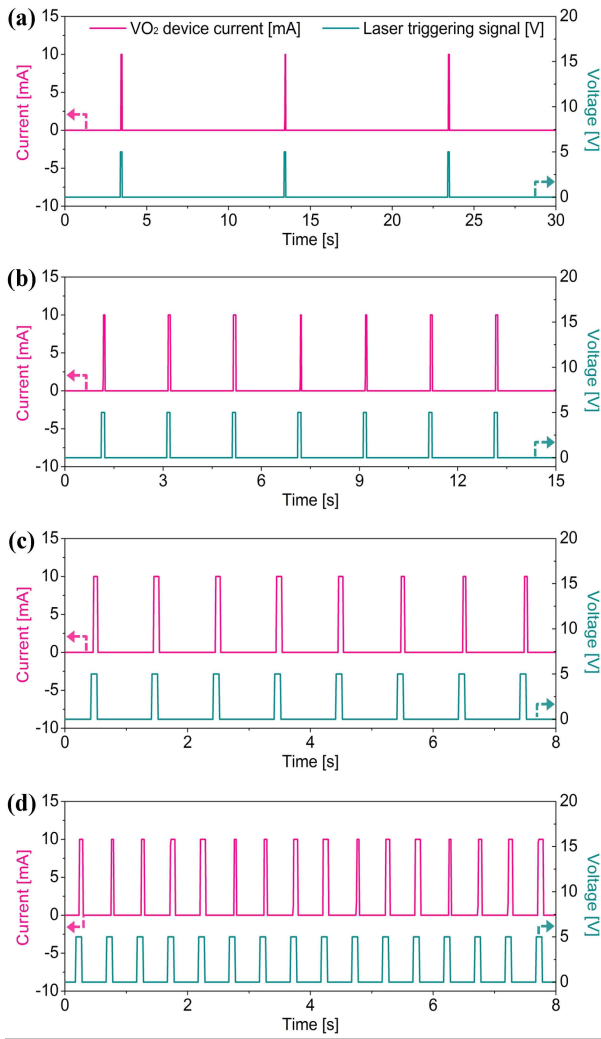


Fig. 5. Variation of transient responses of current flowing through laser-triggered device, when laser pulses have repetition rates of (a) 0.1, (b) 0.5, (c) 1.0, and (d) 2.0Hz

판의 규모(2인치 지름 및 0.5mm 두께)가 상대적으로 크기 때문에 박막에서 기판 방향으로 방출되는 열량이 크기 때문으로 사료된다.

4. 결 론

본 논문에서는 중심 파장 10.6 μm 의 이산화탄소 레이저를 사용하여 VO₂의 광-열 유도 상전이를 통해 고저항성 VO₂ 박막 기반 2단자 평면형 소자에서 양방향

Table 1. Switching characteristics comparison between previous and proposed studies

항 목	이전 연구	본 연구
바이어스 전압	2.76	4.6
오프-상태 전류(μA)	~ 146.6	~ 3.0
온-상태 전류(mA)	10	10
스위칭 대조비	~ 68.2	~ 3333
평균 상승 시간(ms)	~ 192	~ 39
평균 하강 시간(ms)	~ 320	~ 21

전류 스위칭을 구현하였다. 그리고 안정적인 스위칭 동작을 위한 바이어스 전압 범위를 전류 제어 모드로 측정된 VO₂ 소자의 전류-전압 특성을 통하여 도출하였다. 도출된 바이어스 전압 범위를 고려하여 VO₂ 소자에 $\sim 4.6\text{V}$ 의 바이어스 전압을 인가하고, $\sim 6.23\text{W}$ 의 출력 첨두 파워를 갖는 레이저 펄스를 박막에 조사함으로써, 최대 10mA까지 양방향 전류 스위칭을 구현하였으며 ~ 3333 의 스위칭 대조비를 얻을 수 있었다. 특히 레이저 펄스에 의해 양방향 스위칭되는 전류의 과도 응답 측정을 통해 레이저 펄스폭이 $\sim 100\text{ms}$ 이고 반복률이 1.0Hz일 때, 광-열 유도 상전이가 일어날 수 있는 최소 EPP를 $\sim 15.9\text{mJ}$ 로 결정할 수 있었다. 또한 상기 최소 EPP를 고려하여 펄스폭을 100ms로 고정시키고, 다양한 레이저 펄스 반복률(0.1-2.0Hz)에 대해 양방향 전류 스위칭을 구현해보았으며, 스위칭 시 전류의 상승 시간과 하강 시간은 각각 ~ 39 및 $\sim 21\text{ms}$ 로 측정되었다. 이산화탄소 레이저를 사용하여 높은 스위칭 대조비와 빠른 스위칭 시간을 구현한 본 연구 결과는 향후 레이저 트리거링 소자 개발에 대한 관심을 높이고, 산화물 기반 상전이 소자의 미래 전력 소자 및 시스템에 대한 응용을 앞당길 수 있을 것으로 예상된다.

감사의 글

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

References

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] S. Chen, H. Ma, X. Yi, T. Xiong, H. Wang, and C. Ke, "Smart VO₂ thin film for protection of sensitive infrared detectors from strong laser radiation," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 115, pp. 28-31, 2004.
- [5] F. J. Morin, "Oxides which show a metal-insulator transition at the Neel temperature," *Physical Review Letters*, vol. 3, pp. 34-36, 1959.
- [6] E. Arcangeletti, L. Baldassarre, D. D. Castro, S. Lupi, L. Malvasi, 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [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.

◇ 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.