

966nm 레이저 펄스를 이용한 바나듐 이산화물 박막 기반 전자 소자에서의 멤리스터 특성에 관한 연구

(Study on Memristive Characteristics in Electronic Devices Based on
Vanadium Dioxide Thin Films Using 966nm Laser Pulses)

김지훈* · 이용욱**

(Jihoon Kim · Yong Wook Lee)

Abstract

By harnessing the thermal hysteresis behavior of vanadium dioxide(VO_2), we demonstrated multi-resistance states in a two-terminal electronic device based on a VO_2 thin film by using a 966nm infrared laser diode as an excitation light source for resistance modulation. Before stimulating the device using 966nm laser pulses, the thermal hysteresis behavior of the device resistance was measured by using a temperature chamber. After that, the VO_2 device was thermally biased at $\sim 71.6^\circ\text{C}$ so that its temperature fell into the thermal hysteresis region of the device resistance. Six multi-states of the device resistance could be obtained in the fabricated VO_2 device by five successive laser pulses with equal 10ms duration and increasing power. Each resistance states were maintained while the temperature bias was applied. And, the resistance fluctuation level was within 2.2% of the stabilized resistance and decreased down to less than 0.9% of the stabilized resistance 5s after the illumination.

Key Words : Vanadium Dioxide, Thin Films, Metal-Insulator Transition, Memristor, Laser

1. 서 론

바나듐 이산화물(vanadium dioxide: 이하 VO_2)은 절연체 특성을 나타내는 단사정계 구조(monoclinic structure)와 금속 특성을 나타내는 정방정계 구조(tetragonal structure) 간의 가역적인 구조 상전이(structural phase transition)를 보이는 강상관계 물질(strongly correlated material)이다[1-4]. 이러한 구조 상전이는 기본적으로 열에 의해 발생되고, 가열-냉각 순환(cycle) 시 나타나는 이력(hysteresis) 현상과 함

* 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. 7. 31
Accepted : 2015. 9. 19

게 10^4 배 이상의 저항 변화를 수반한다[5-6]. 2009년에는 이러한 전기 저항의 열적 이력 특성을 이용하여 VO₂ 소자에 전압 펄스를 인가함으로써 순차적으로 감소하는 저항 상태, 즉 VO₂ 기반의 멤리스터(memristor)를 최초로 구현하였다[7]. 멤리스터는 회로를 구성하는 기본적인 세 가지 요소인 저항, 인덕턴스(inductance), 커패시턴스(capacitance) 외의 네 번째 집중 정수(lumped parameter) 회로 요소로서 전하와 자속(magnetic flux)의 관계로 정의되며, 1971년 L. Chua에 의해 이론적으로 예측되었다[8]. 멤리스터의 존재에 대한 예측은 수십 년 전에 이루어졌지만, 실질적인 멤리스터 소자는 2000년대 후반 HP 연구진들에 의해 티타늄 이산화물(titanium dioxide: 이하 TiO₂) 박막 소자가 강한 전기장 하에 있을 때 갖는 비선형적 전류-전압 이력 특성을 이용하여 구현되었다[9-10]. 그리고 2010년에는 VO₂ 소자에 온도 바이어스(bias)를 인가하고 순차적인 전압 및 광 펄스를 인가함으로써, 소자에서 다양한 상태의 저항과 광 투과도(transmittance)를 달성 및 유지한 결과가 보고되었다[11]. 또한 2012년에는 VO₂/TiO₂ 이종접합(heterostructure) 박막을 특정 온도로 유지한 상태에서 전류 펄스를 인가하여 다양한 저항 상태를 구현한 결과가 보고되었다[12]. 최근에는 VO₂ 박막 기반 2단자 평면형 소자에서 광 파워에 따른 소자 저항의 이력 특성을 이용하여, 광 바이어스를 통한 멤리스터 구현 사례가 보고되었다[13]. 이와 같이 이전의 많은 연구들에서 전기 또는 광 자극(stimulus)이 VO₂ 박막 기반 멤리스터의 메모리 기록 수단으로 사용되어왔다. 특히 전기적 자극과 비교하였을 때 광 자극은 짧은 펄스 지속 시간 즉, 짧은 펄스폭으로도 소자의 저항을 바꿀 수 있고, 이를 통해 스위칭 손실을 줄일 수 있으며, 광 자극원과 소자가 전기적으로 절연되어 있기 때문에 전기적 펄스나 서지(surge)에 의한 멤리스터 소자의 손상 가능성을 원천적으로 차단할 수 있다. 따라서 이러한 광 여기(excitation) 방식은 멤리스터 기반 메모리 소자에서 효과적이고 신뢰성 높은 기록 수단으로 사용될 수 있다.

본 논문에서는 966nm 레이저 다이오드(laser diode: 이하 LD)를 저항 스위칭을 위한 여기 광원으로 사용

하여 VO₂ 박막 기반 2단자 평면형 소자에서 멤리스터 특성을 조사하였다. 선행 연구 중 VO₂ 박막 소자에 672nm의 적색 가시광선 레이저를 사용하여 다양한 저항 상태를 구현한 사례가 있었으며, 이 연구에서는 레이저의 출력 파워를 유지한 상태에서 펄스폭을 점차 증가시키면서 동일한 양의 저항 강하를 얻을 수 있었다[11]. 그러나 증가된 레이저 펄스폭으로 인해 스위칭 후 저항 상태에 장시간 저항값의 변동(fluctuation)이 발생하였고, 2s의 폭을 가지는 레이저 펄스를 조사(illumination)하였을 때는 저항 변동이 25s 이상 지속되었다. 특히 동일한 지속시간(0.6s)을 갖는 연속적인 레이저 펄스는 뚜렷한 소자 저항 강하를 유도하지 못했다. 따라서 본 논문에서는 VO₂ 소자의 저항을 이산적(discrete)으로 뚜렷하게 변화시키면서 스위칭 직후 저항 즉, 초기 저항의 변동을 줄이기 위해, 짧고 동일한 펄스폭을 가지면서 광 파워가 점차 증가하는 966nm 파장의 레이저 펄스들을 사용하였다. 특히 966nm 파장을 갖는 빛의 VO₂ 박막 흡수율은 672nm 파장을 갖는 빛에 비해 낮으며, 이는 966nm 레이저가 672nm 레이저보다 박막의 가열을 억제하는데 더 효과적이라는 것을 의미한다. 따라서 966nm 파장에서 VO₂ 박막의 낮은 광 흡수율은 초기 저항 변동의 감소에 기여할 수 있다. 본 논문에서 멤리스터 특성을 조사하기 위한 VO₂ 소자는 증착된 VO₂ 박막을 식각한 후 식각된 박막 위에 전극을 형성함으로써 제작하였으며, 소자 저항의 열 이력 특성은 45~80°C에서 조사되었다. 966nm LD로 소자를 조사하기 전에, 소자의 온도는 소자 저항의 열 이력 특성 영역에 있는 ~71.6°C(바이어스 온도)로 유지시켰다. 광섬유 집속기(optical fiber focuser)를 통해 출력되는 10ms 펄스폭의 레이저 펄스는 소자 조사 직후 초기 저항의 시간적 변동을 억제하면서도 소자 저항을 뚜렷이 구분되게 감소시키며 다양한 저항 상태의 구현을 가능하게 해주었다. 그리고 레이저 펄스 자극에 의해 스위칭된 개별 저항 상태는 온도 바이어스가 인가되어 있는 한 계속 유지되었다. 제작된 소자에서는 동일한 펄스폭을 가지면서 점점 파워가 증가하는 레이저 펄스를 순차적으로 다섯 번 소자에 조사하여, 총 여섯 가지의 다양한 저항 상태를 구현할 수 있었다.

2. 실험 구성 및 준비

그림 1은 중심 파장이 966nm인 적외선 LD(Lumics, LU0975T100)를 이용해 VO₂ 박막 기반 2단자 평면형 소자에 레이저를 조사함으로써 다양한 저항 상태를 얻기 위한 실험 구성도이다. 사용된 LD의 최대 출력 파워는 광 파워 미터(Ophir Nova II, 7Z02696)에 의해 ~7.32W로 측정되었다. 또한 본 LD는 1kHz까지 직접 변조(direct modulation)가 가능하며, 이 때 최소 펄스폭은 500μs이다. 그림 1의 오른쪽 상단에 있는 내부 그림은 ~90mW의 출력 파워를 갖는 LD 출력 스펙트럼을 광 스펙트럼 분석기(Yokogawa AQ6370C)를 이용하여 0.05nm의 분해 대역폭으로 측정한 결과를 보여주고 있다. LD에 연결된 다중모드 광섬유(multi-mode fiber)로부터 출력되는 레이저 빔은 광섬유 직진기(Thorlabs F260FC-1550)를 지나면서 직진화(collimation)되고, 집속을 위해 비구면 렌즈(Thorlabs C220TME-B)에 입사된다. 광섬유 집속기에서 직진화를 위해 내장된 비구면 렌즈의 1/e² 빔 직경(bean diameter)은 입사광의 파장이 1550nm일 때 ~3.0mm이고, 이론적인 빔 발산 각(full-angle beam divergence)은 ~663μrad이다. 개구수(numerical aperture)와 유효 초점거리(effective focal length)는 입사광의 파장이 1550nm일 때 각각 0.16과 ~5.58mm이었다. 직진화된 빔을 집속시키기 위해 사용되는 또 다른 비구면 렌즈의 개구수, 유효 구경(clear aperture), 유효 초점거리는 입사광의 파장이 633nm일 때, 각각 0.25, 5.5mm, 11.0mm이었다. 집속용 비구면 렌즈는 광섬유 직진기의 출력단에 직접 부착되며, 여기서 출력되는 레이저 빔이 VO₂ 박막에 수직으로 조사된다. 집속 렌즈와 광섬유 직진기를 포함하는 빔 집속기의 위치는 박막 표면에 조사되는 빔 직경이 ~800μm가 될 수 있도록 xyz 스테이지를 이용하여 세밀하게 조절되었다. 빔 집속기로부터 나오는 출력 광 파워는 LD 구동 전류가 최대치인 10A일 때 ~6.39W로 측정되었으며, 박막 표면에서의 광 세기(optical intensity)는 입사되는 광 파워가 ~6.39W일 때 ~1271.2W/cm²로 계산되었다.

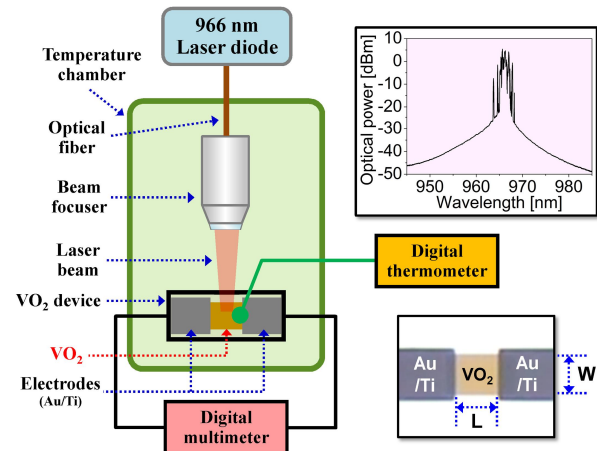


Fig. 1. Experimental setup for obtaining multiple resistance states in two-terminal planar VO₂ device using 966nm LD

2단자 평면형 소자의 제작을 위해 VO₂ 박막은 펄스 레이저 증착(pulsed laser deposition) 기법으로 사파이어 기판(Al₂O₃ substrate) 위에 성장되었으며, 성장된 박막의 평균 두께는 ~100nm로 측정되었다. 성장된 박막에 전극을 형성하기 위해 이온 빔(ion beam) 식각 및 포토리소그래피(photolithography) 공정을 통해 Au 및 Ti 전극을 박막 위에 형성하였다. 그림 1의 오른쪽 하단에 있는 내부 그림은 제작된 2단자 평면형 소자의 광학 현미경 사진으로서 소자의 전극 간격(L)과 노출된 박막의 폭(W)은 모두 100μm이었다. 소자의 온도를 조절하기 위하여 제작된 소자와 빔 집속기 등은 온도 챔버(chamber) 내에 위치시켰다. 그리고 실험에서 소자의 저항과 온도를 정확하게 측정하기 위하여 디지털 멀티미터(Keithley 2410)와 K형 열전쌍(thermocouple)이 장착된 디지털 온도계(Fluke 51 II)를 사용하였다.

3. 실험 결과 및 논의

그림 2는 제작된 VO₂ 소자 저항의 온도 의존성을 나타낸다. 적색 원형 기호는 소자의 온도를 85℃까지 가열하며 저항을 측정한 결과이며, 청색 삼각형 기호는 온도를 다시 45℃까지 낮추며 저항을 측정한 결과이다. 저항이 가장 높을 때와 낮을 때는 ~10²배 정도

의 차이가 있었으며, 70°C 부근에서 VO₂의 상전이에 따른 저항의 열 이력 특성을 관찰할 수 있었다. 또한 소자 저항의 최대 이력 폭은 ~7.0°C이었다. 왼쪽 하단의 내부 그림은 소자의 온도를 ~71.6°C로 유지한 상태에서 노출된 VO₂ 박막에 10ms의 펄스폭을 갖는 단일 레이저 펄스를 조사하였을 때, 시간에 따른 소자 저항의 변화를 보여주고 있다. 단일 펄스 조사 시 LD의 구동 전류는 10A이었고, 이 때 빔 집속기에서 출력되는 광의 파워는 ~6.39W이었다. VO₂ 박막의 노출된 표면(10⁻⁴cm²)에 실제로 전달되는 광 파워는 광 세기(~1271.2W/cm²)를 이용하여 ~127.1mW로 계산되었다. 그림으로부터 레이저 펄스를 박막에 조사하는 즉시, 소자의 저항은 ~17.279kΩ에서 ~2.958kΩ으로 떨어진다 것을 알 수 있다. 바이어스 온도가 ~71.6°C로 유지된 상태에서 레이저 펄스가 박막을 자극하면, 그림 2의 A에 위치하던 소자의 저항은 레이저 펄스 자극으로 증가된 온도에 의해 가열 곡선을 따라 저항이 감소한다. 그러나 레이저 펄스에 의해 순간적으로 상승한 온도는 온도 챔버의 온도 유지 특성에 의해 곧바로 열 평형점(thermal equilibrium point)인 ~71.6°C로 돌아오게 된다. 그런데 이 때 소자의 저항은 가열되었던 곡선이 아닌 냉각 곡선의 경향을 따르게 되어 최종적으로는 그림 2의 B 지점에 도달하게 된다. 즉 단일

고출력 레이저 펄스를 조사함으로써 소자의 저항은 A 지점에서 B 지점으로 바뀌게 된다. 레이저 조사 직후 소자 저항의 최대 변동폭은 안정화된 저항 값(~2.958kΩ)의 ~0.40%인 ~12Ω이었으며, 5s의 안정화 시간이 지난 뒤에는 ~0.09%까지 감소되었다. 이전의 연구[11]에서는 소자에 조사되는 레이저의 펄스폭을 3ms에서 2000ms까지 증가시키면 저항 변동도 ~5.5%에서 ~61.5%로 함께 증가하였다. 안정화 시간 역시 펄스폭이 증가되면 함께 늘어나는 경향을 보였으며, 600ms 펄스폭의 레이저 펄스를 조사하였을 때는 저항이 안정화되는데 ~30s의 시간이 필요하였다. 이와 대조적으로 본 연구에서 달성한 상대적으로 낮은 초기 저항 변동은 짧은 레이저 펄스폭과 VO₂ 박막의 광 흡수율이 낮은 레이저 파장을 사용하였기 때문으로 사료된다.

특히 레이저 펄스 조사 이후의 편위(excursion) 곡선이 냉각 곡선의 경향을 따르는 특성은 초기 저항 변동을 억제하는 데에 있어 중요한 역할을 한다. 냉각 곡선의 모양은 VO₂ 박막의 품질에 의해 결정되는데, 고온부에서 비교적 평탄한 냉각 곡선은 소자의 저항이 큰 변동 없이 안정화 될 수 있도록 도와준다. 일반적으로 VO₂ 박막의 두께가 증가하면 박막을 구성하는 그레인(grain)의 평균 크기도 증가하는데, 그레인 경계의 밀도 및 관련된 결함(defect)은 감소하므로 선명하고 강한 상전이를 유도하게 된다[14]. 그러므로 VO₂의 그레인 크기는 박막의 열 이력 곡선의 진폭(amplitude)과 선명도(sharpness)에 영향을 주며, VO₂ 박막을 두껍게 제작하여 열 이력 곡선을 선명하게 하면 소자의 냉각 곡선 또한 더욱 평탄하게 된다. 또한 VO₂ 소자의 온도가 열 평형점인 초기 온도로 돌아오는 시간은 소자의 구조에 크게 의존하는데, 이는 소자 저항의 변동에 영향을 주는 또 다른 요인이 된다. 만약 열 평형점으로의 온도 복원 시간을 더 짧게 할 수 있다면, 소자 저항의 초기 변동 역시 더 짧아질 것으로 사료된다.

그림 3은 소자에 ~71.6°C의 온도 바이어스를 인가한 상태에서, 펄스폭이 10ms로 동일한 레이저 펄스를 순차적으로 다섯 번 박막에 조사했을 때의 저항 변화를 나타낸다. 총 다섯 번의 레이저 펄스를 조사하는

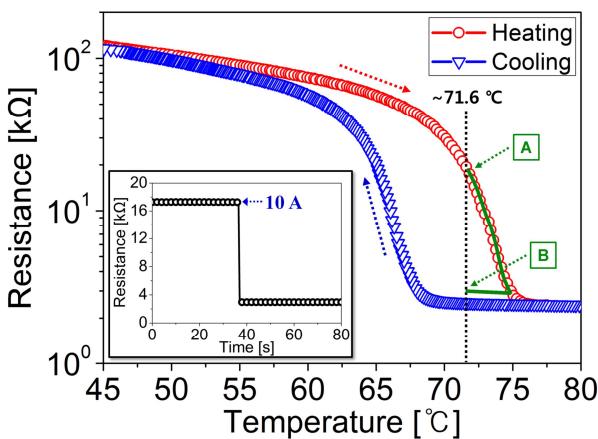


Fig. 2. Thermal hysteresis behavior of VO₂ device resistance, and resistance change after laser pulse irradiation at bias temperature of ~71.6°C

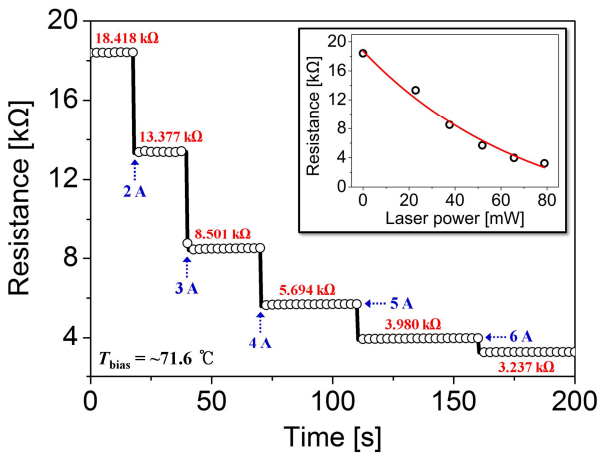


Fig. 3. Variation of device resistance due to five subsequent laser pulses and resistance change with respect to laser power conveyed to film

동안 각 펄스 사이에는 20s에서 60s까지 펄스 미조사 시간을 두었으며, 펄스 미조사 시간은 펄스 당 10s씩 증가시켰다. 레이저를 조사하기 전에는 소자의 온도가 열 이력 곡선의 중간 지점에 위치할 수 있도록 온도 바이어스를 $\sim 71.6^{\circ}\text{C}$ 로 유지시켰다. 매 펄스마다 LD의 구동 전류는 2A부터 6A까지 1A씩 증가시켰다. 빔 집속기에서의 레이저 출력 파워는 구동 전류의 증가에 따라 $\sim 1.14\text{W}$ 에서 $\sim 3.97\text{W}$ 까지 증가하였고, 실제 박막에 전달되는 광 파워 역시 $\sim 22.9\text{mW}$ 에서 $\sim 78.9\text{mW}$ 까지 증가하였다. 표 1은 LD 구동 전류에 따라 빔 집속기로부터 출력되는 레이저 파워와 박막 표면에 조사되는 빔의 직경이 $\sim 800\mu\text{m}$ 일 때 실제로 박막에 전달되는 레이저 파워를 나타낸다. 6A 이하의 구동 전류에서는 레이저 출력 파워와의 관계가 거의 선형에 가깝지만, 6A를 초과할 경우 약간의 비선형성을 보였다.

그림 3에서 확인할 수 있듯이 순차적으로 조사되는 레이저 펄스는 매 펄스마다 소자의 저항을 $\sim 18.418\text{k}\Omega$ 에서 시작하여 $\sim 3.237\text{k}\Omega$ 까지 단조 감소시켰으며, 초기에 감소한 양만큼 동일하게 저항을 감소시키기 위해서는 더 큰 에너지의 펄스들이 필요하였다. 이렇게 변조된 저항은 온도 바이어스가 유지되는 한 그 값이 지속되었으며, 이러한 저항 지속 현상은 1시간

정도의 관측을 통해 확인하였다. 그림 3과 같은 순차적인 저항 감소가 발생하는 이유는 각 레이저 펄스 자극에 의해 소자에 순간적으로 열에너지가 전달되고, 그 결과 소자의 온도가 약간 증가하면서 소자 저항의 열 이력 곡선을 따라 저항 감소가 발생하기 때문이다. 레이저 펄스 자극이 가해진 후 펄스 미조사 시간 동안 소자의 온도는 열 평형점(바이어스 온도)으로 돌아오지만, 소자의 저항은 원 상태로 복원되지 않는다. 그 이유는 그림 2에 나타난 것처럼 소자 저항의 열 이력 특성으로 인해 온도가 열 평형점으로 돌아가면서 감소할 때는 저항이 냉각 곡선의 경향을 따르기 때문이다.

Table 1. Relationship between output laser power and LD-driving current

LD 구동 전류 (A)	빔 집속기로부터 출력되는 레이저 파워(W)	실제로 박막에 전달되는 레이저 파워(mW)
2	~ 1.136	~ 22.9
3	~ 1.879	~ 37.6
4	~ 2.602	~ 51.9
5	~ 3.305	~ 65.3
6	~ 3.970	~ 78.9
10	~ 6.390	~ 127.1

레이저 펄스 조사 후 시간에 따른 소자 저항의 변동을 분석하기 위해, 그림 3에 나타난 각 펄스 별 소자 저항의 초기 변화에 대해 조사하였다. LD의 구동 전류가 2A부터 6A까지 1A씩 순차적으로 증가할 때 최대 저항 변동은 각각 103, 117, 115, 86, 그리고 29% 이하였다. 이 값은 최종적으로 안정화된 저항 값인 ~ 13.377 , ~ 8.501 , ~ 5.694 , ~ 3.980 , $\sim 3.237\text{k}\Omega$ 과 비교하였을 때 각각 ~ 0.77 , ~ 1.38 , ~ 2.02 , ~ 2.16 , $\sim 0.90\%$ 에 해당하는 변동이었다. 특히 레이저 펄스 조사 후 5s의 안정화 시간이 지난 뒤에는, 저항 변동률이 최종적으로 안정화된 저항 값의 ~ 0.36 , ~ 0.60 , ~ 0.61 , ~ 0.83 , $\sim 0.27\%$ 까지 감소하였다. 표 2에 요약된 분석 결과로부터 레이저 펄스 조사에 따른 소자 초기 저항의 최대 변동률은 2.2% 이내였으며, 5s의 안정화 시간 후에는

0.9% 이하로 감소되었음을 알 수 있다. 소자의 저항을 변화시키기 위한 레이저의 최대 펄스 에너지는 펄스 폭 10ms와 실제 박막에 전달되는 에너지 ~78.9mW를 곱하여 ~789μJ로 계산되었는데, 이는 이전 연구 [11]에 사용된 최소 펄스 에너지와 유사한 수준이었다. 또한 VO₂ 박막이 966nm에서 45% 이하의 낮은 흡수율 (~26% @ 300K, ~47% @ 355K)을 가지기 때문에 [15], 레이저 조사 이후에도 낮은 저항 변동률을 보이는 것으로 사료된다.

마지막으로 그림 3의 우측 상단에 있는 내부 그림은 실제 VO₂ 박막에 전달되는 광 파워에 따른 소자 저항의 변화를 나타낸 것으로, 적색 실선은 측정된 결과를 지수형 감쇠 함수(exponential decay function)에 근사시킨 결과이다. 소자 저항은 레이저 파워에 따라 지수 함수적으로 변화하기 때문에, 몇 번의 충분한 파워를 갖는 레이저 펄스 조사 이후에는 저항 변동이 거의 없게 된다. 이는 VO₂ 소자에서 얻을 수 있는 저항 상태의 개수가 유한함을 의미한다. 추가적으로 매 펄스마다 동일한 저항 변화를 얻기 위해서는 LD 구동 전류를 지수 함수적으로 변화시킬 필요가 있으며, 이 경우 더 많은 저항 상태를 구현할 수 있을 것으로 예상된다.

Table 2. Stabilized values of device resistance after optical stimulus and their fluctuation levels according to LD-driving currents

LD 구동 전류 (A)	안정화 된 저항 (Ω)	저항 변동 (Ω)	저항 변동률 (%)	
			광 조사 직후	조사 5s 경과 후
2	13,377	103	~0.77	~0.36
3	8,501	117	~1.38	~0.60
4	5,694	115	~2.02	~0.61
5	3,980	86	~2.16	~0.83
6	3,237	29	~0.90	~0.27

4. 결 론

본 논문에서는 중심 파장이 966nm인 LD를 광 자극 원료로 사용하여 VO₂ 박막 기반 2단자 평면형 소자에서 맬리스터 특성을 조사하였다. VO₂ 소자에서 이산

적으로 뚜렷이 구분되는 다양한 저항 상태를 구현함과 동시에 광 조사 후 초기 저항 변동을 억제하기 위하여, 10ms의 동일한 펄스폭을 갖는 레이저 펄스의 광 파워를 ~22.9mW에서 ~78.9mW까지 순차적으로 증가시키면서 레이저 펄스를 소자에 조사하였다. ~71.6°C로 유지된 소자에 동일한 펄스폭을 갖는 레이저 펄스의 파워를 점점 증가시키며 순차적으로 다섯 번 조사한 결과, 총 여섯 가지의 다양한 저항 상태를 얻을 수 있었다. 레이저 조사 직후의 저항 변동률은 최종적으로 안정화된 저항값과 비교하였을 때 2.2% 이하였으며, 5s의 안정화 시간이 지난 뒤에는 0.9% 이하로 감소하였다. 광 자극을 통해 낮은 저항 변동률과 빠른 안정화 시간을 갖는 VO₂ 박막 기반 맬리스터는 향후 광을 기록 수단으로 사용하는 차세대 메모리 소자의 개발에 대한 관심을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국 에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20131020400830)

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] W. F. Brinkman and T. M. Rice, "Application of Gutzwiller's Variational Method to the Metal-Insulator Transition," *Physical Review B*, vol. 2, pp. 4302-4304, 1970.
- [3] H.-T. Kim, Y. W. Lee, B.-J. Kim, B.-G. Chae, S. J. Yun, K.-Y. Kang, K.-J. Han, K. Yee, and Y.-S. Lim, "Monoclinic and Correlated Metal Phase in VO₂ as Evidence of the Mott Transition: Coherent Phonon Analysis," *Physical Review Letters*, vol. 97, pp. 266401(1-4), 2006.
- [4] 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.
- [5] B.-G. Chae, H.-T. Kim, S. J. Yun, B.-J. Kim, Y. W. Lee, D.-H. Youn, K.-Y. Kang, "Highly oriented VO₂ thin films prepared by sol-gel deposition," *Electrochemical and Solid-State Letters*, vol. 9(1), pp. C12-C14, 2006.
- [6] M. M. Qazilbash, K. S. Burch, D. Whisler, D.

- Shrekenhamer, B.-G. Chae, H.-T. Kim, D. N. Basov, "Correlated metallic state of vanadium dioxide," *Physical Review B*, vol. 98, pp. 205118(1-5), 2006.
- [7] T. Driscoll, H.-T. Kim, B.-G. Chae, M. D. Ventra, and D. N. Basov, "Phase-transition driven memristive system," *Applied Physics Letters*, vol. 95, pp. 043503(1-3), 2009.
- [8] L.O. Chua, "Memristor-The missing circuit element," *IEEE Transactions Circuit Theory*, vol. 18, pp. 507-519, 1971.
- [9] J. J. Yang, M. D. Pickett, X. Li, D. A. A. Ohlberg, D. R. Stewart, and R. S. Williams, "Memristive switching mechanism for metal/oxide/metal nanodevices," *Nature Nanotechnology*, vol. 3, pp. 429-433, 2008.
- [10] D. B. Strukov, G. S. Snider, D. R. Stewart, and R. S. Williams, "The fourth circuit element," *Nature*, vol. 453, pp. 80-83, 2008.
- [11] H. Coy, R. Cabrera, N. Sepulveda, and F. E. Fernandez, "Opto-electronic and full-optical multiple state memory response in phase-change materials," *Journal of Applied Physics*, vol. 108, pp. 113115(1-6), 2010.
- [12] L. Pellegrino, N. Manca, T. Kanki, H. Tanaka, M. Biasotti, E. Bellingeri, A. S. Siri, and D. Marre, "Multistate Memory Devices Based on Free standing VO₂/TiO₂ Microstructures Driven by Joule Self Heating," *Advanced Materials*, vol. 24, pp. 2929-2934, 2012.
- [13] G. Seo, B.-J. Kim, H.-T. Kim, and Y. W. Lee, "Thermally- or optically-biased memristive switching in two-terminal VO₂ devices," *Current Applied Physics*, vol. 14, pp. 1251-1256, 2014.
- [14] D. Brassard, S. Fourmaux, M. Jean-Jacques, J. C. Kieffer, and M. A. E. Khakani, "Grain size effect on the semiconductor-metal phase transition characteristics of magnetron-sputtered VO₂ thin films," *Applied Physics Letters*, vol. 87, pp. 051910(1-3), 2005.
- [15] G. Neto, L. A. L. d. Almeida, A. M. N. Lima, C. S. Moreira, H. Neff, I. A. Khrebtov, and V. G. Malyarov, "Figures of merit and optimization of a VO₂ microbolometer with strong electrothermal feedback," *Optical Engineering*, vol. 47, pp. 073603(1-15), 2008.

◇ 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.