



공학박사학위논문

바나듐 이산화물 박막 기반 전자 소자의 광열 제어 전류 스위칭에 관한 연구



2021년 2월

부경대학교대학원

전기공학과

김 지 훈

공학박사학위논문

바나듐 이산화물 박막 기반 전자 소자의 광열 제어 전류 스위칭에 관한 연구

지도교수 이 용 욱

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함.

2021년 2월

부경대학교대학원

전기공학과

김 지 훈

김지훈의 공학박사 학위논문을 인준함.

2021년 2월 19일



I. 서 론	1
1.1. 연구의 배경	1
Ⅱ. 이론적 배경 및 선행연구	4
2.1. 바나듐 이산화물 (VO ₂)	4
2.2. VO ₂ 박막 기반 2단자 평면형 전자 소자	6
2.3. 선행연구 소개	7
2.4. 기존 연구의 문제점 및 본 연구 목적	
E III	
Ⅲ. 전류 스위칭 실험 및 결과	13
3.1. VO ₂ 소자 제작 및 특성 조사	13
3.2. 실험 셋업 구성	17
3.3. 실험 결과 분석	19
Ⅳ. VO2 소자 모델링 및 시뮬레이션	25
4.1. VO2 박막 기반 전자 소자 및 실험환경 모델링	25
4.2. 기판 크기별 전류 스위칭 특성 분석	34
4.3. 열 접촉 조건에 따른 전류 스위칭 특성 분석	42
4.4. 열원 파워에 따른 전류 스위칭 특성 분석	46
4.5. 박막 크기별 전류 스위칭 특성 분석	50
V. 결 론	57

5.1.	연구	결과의	요약	57

5.2.	연구의	시사점				 	58
5.3.	연구의	한계점과	향후	연구의	방향	 	59



표 목 차

<丑	2-1>	VO2 박막 기반 전자 소자에서 레이저를 이용한 양방향 전류 스
		위칭을 구현한 선행연구들의 스위칭 성능 요약9
<표	4-1>	VO2 박막 패치의 크기에 따른 양방향 전류 스위칭 특성을 분석
		하기 위한 시뮬레이션 조건 (열원 세기 고정)51
<표	4-2>	VO2 박막 패치의 크기에 따른 양방향 전류 스위칭 특성을 분석
		하기 위한 시뮬레이션 조건 (열원 파워 고정)54



그림목차

<그림 2-1> VO ₂ 박막의 온도 대 저항 특성과 상전이 전후의 결정 구조
모식도4
<그림 2-2> VO2 박막 기반 2단자 소자의 (좌) 평면도와 (우) 단면도6
<그림 3-1> 제작된 VO2 박막 기반 전자 소자의 X선 회절 패턴과 평면
위에서 촬영한 광학 현미경 사진 (내부 그림)13
<그림 3-2> 제작된 VO2 소자의 온도에 따른 전류-전압 특성과 상온에서
측정한 더 넓은 전압 범위의 전류-전압 특성 (오른쪽 내부
그림) 및 저항-온도 특성 (왼쪽 내부 그림)15
<그림 3-3> VO2 박막 기반 전자 소자에서 근적외선 레이저 펄스를 사용
하여 양방향 전류 스위칭을 구현하기 위한 실험 모식도와 제
작된 VO ₂ 소자의 구조도 (내부 그림)17
<그림 3-4> 0에서 10 V까지 순차적으로 증가하는 바이어스 전압과 주기
적으로 점멸하는 레이저 펄스가 인가된 VO2 소자에 흐르는
전류의 과도 응답19
<그림 3-5> 반복률이 1.0 Hz이고 온-상태 펄스 폭이 각각 (a) 50, (b) 75,
(c) 100, 그리고 (d) 150 ms인 레이저 펄스를 VO ₂ 소자에 조
사하였을 때 전류의 과도 응답21
<그림 3-6> 온-상태 펄스 폭이 100 ms이고 반복률이 각각 (a) 0.1, (b)
0.5, (c) 1.0, 그리고 (d) 2.0 Hz인 레이저 펄스를 VO ₂ 소자에
조사하였을 때 전류의 과도 응답23
<그림 4-1> COMSOL로 모델링 된 기판 크기가 45 × 45 mm ² 이고 VO ₂
박막 크기가 500 × 500 μm ² 인 2단자 소자의 중심부를 확대
한 모습과 전체 모습 (내부 그림)26

<그림 4-2> 모델링 된 VO₂ 박막의 온도-비저항 곡선 (좌) 및 입사되는 빛의 파장이 976 nm 근방일 때의 온도별 광 흡수율 (우)--27 <그림 4-3> 모델링 된 사파이어 기판의 온도별 비열용량 (좌) 및 열전도 도 (우)-----28 <그림 4-4> 동일한 레이저·열원 펄스 조건에서 실제 실험으로 측정된 소 자 전류의 과도 응답 (좌) 및 모델링 된 소자를 이용해 시뮬 레이션으로 계산된 소자 전류의 과도 응답 (우)------33 <그림 4-5> 모델링 된 VO₂ 소자를 이용해 양방향 전류 스위칭을 시뮬레 이션하였을 때 특정 시점에서 계산된 온도 분포 ------34 <그림 4-6> 양방향 전류 스위칭 시뮬레이션을 통해 계산된, 모델링 된 소 자에 흐르는 전류의 과도 응답-----36 <그림 4-7> 양방향 전류 스위칭 시뮬레이션을 통해 계산된, 모델링 된 소 자 내 특정 위치들의 시간별 온도 변화 ------ 37 <그림 4-8> 모델링 된 VO2 소자에 펄스 폭이 100 ms이고 반복률이 3.0 Hz인 열원을 인가하였을 때 다양한 기관 면적에 따른 VO2 박막 중심부의 온도 변화------38 <그림 4-9> 모델링 된 VO2 소자에 펄스 폭이 100 ms이고 반복률이 3.0 Hz인 열원을 인가하였을 때 다양한 기판 면적에 따른 소자 전류의 과도 응답------39 <그림 4-10> 모델링 된 VO2 소자에 펄스 폭이 100 ms이고 반복률이 3.0 Hz인 열원을 인가하였을 때 기판 면적별로 분석된 안정적인 양방향 전류 스위칭이 가능한 최대 횟수 ------ 40 <그림 4-11> VO2 소자와 알루미늄 블록 간의 위치 관계 및 구조를 과장 하여 표현한 뒤 측면에서 바라본 단면도 (좌) 및 두 구조물 사이의 접촉부 모식도 (우)----- 42

<그림 4-12> VO2 소자의 기판과 알루미늄 블록 간의 열투과율에 따라 분 석된 안정적인 양방향 전류 스위칭이 가능한 최대 횟수 --- 45 <그림 4-13> 모델링 된 VO₂ 소자에 펄스 폭이 100 ms이고 반복률이 2.0 Hz인 열원을 인가하였을 때 열원의 파워에 따른 VO2 박막 중심부의 온도 변화 ------47 <그림 4-14> 모델링 된 VO2 소자에 펄스 폭이 100 ms이고 반복률이 2.0 Hz인 열원을 인가하였을 때 열원의 파워에 따른 소자 전류 의 과도 응답----- 48 <그림 4-15> VO2 소자에 인가되는 열원의 파워에 따라 분석된 안정적인 양방향 전류 스위칭이 가능한 최대 횟수 ------ 49 <그림 4-16> 모델링 된 VO2 소자에 동일한 펄스 특성과 세기를 가지는 열원을 인가하였을 때 박막 크기에 따른 전류의 과도 응답 ----- 52 <그림 4-17> 모델링 된 VO2 소자에 동일한 펄스 특성과 세기를 가지는 열원을 인가하였을 때 박막 크기에 따른 중심부의 온도 변 화-----53 <그림 4-18> 모델링 된 VO2 소자에 동일한 펄스 특성과 파워를 가지는 열원을 인가하였을 때 박막 크기에 따른 중심부의 온도 변 화 ------ 56 <그림 5-1> 모델링 된 소자에서 VO2 박막의 광 흡수율과 사파이어 기판 의 열전도도를 2배 향상시킨 후 반복률이 20 Hz인 열원을 인

가하였을 때 소자 전류의 과도 응답-----60

Study on Photothermally Controlled Current Switching of Electronic Devices Based on Vanadium Dioxide Thin Films

Jihoon Kim

Department of Electrical Engineering, The Graduate School, Pukyong National University

Abstract

Vanadium dioxide (VO_2) , one of the representative oxide semiconductors, exhibits a reversible phase transition (PT) between metallic and insulating states at certain critical temperature. These PT characteristics of VO_2 can be applied to a novel electronic device for current switching controlled by optical stimulation. In several studies, photothermally induced PT has been triggered by irradiating a focused high-power laser pulse onto a VO₂ thin film. In addition, the current flowing through the device could be controlled. However, in recent studies, the rate of improvement in switching performance began to decrease and tends to saturate. As the control method based on the photothermal effect is mediated by light-induced heat, the thermal characteristics of the device are directly related to the switching characteristics. To investigate the factors affecting the switching performance, it is necessary to scrutinize the temperature distribution and temporal variation by fabricating and testing devices with various structures. However, these characteristics are challenging to analyze experimentally owing to some practical limitations. In this dissertation, an in-depth analysis of the switching characteristics according to various conditions was carried out and a solution to improve the switching performance was proposed. First, a VO_2 device was fabricated and bidirectional current switching was performed to confirm the upper limit of the performance and obtain the boundary condition for modeling. Second, the fabricated VO_2 device was modeled by employing a commercial software. Numerous simulations were performed by changing various conditions. The dimensions of the substrate and thermal conductivity dominantly determined the switching stability and performance. To maintain a stable operation even under repeated switching, it was necessary to select the appropriate dimensions of the substrate and laser power. The material of the substrate must be changed to a material having a higher thermal conductivity to improve the fundamental switching performance.

I. 서 론

1.1. 연구의 배경

전기공학은 현대 문명의 기반이 되는 중요한 학문으로, 인류가 생활하는 모든 곳에는 전기가 사용되고 있다고 해도 과언이 아니다. 전기공학의 눈 부신 발전으로 인해 최근에는 전기자동차 (electric vehicle) 가 본격적으로 상용화되기 시작하였고, 이전보다 더 밝은 디스플레이 (display) 와 더 높 은 성능을 보이면서도 오랜 시간 동작이 가능한 스마트폰, 태블릿, 노트북 등이 생활에 깊숙이 파고들었다. 이러한 성과는 전기공학을 포함한 다양한 분야의 엔지니어들의 노력에 의해 맺어진 결실이지만, 여기서는 그중에서 도 전력 반도체 소자 (power semiconductor device) 에 더 큰 공을 돌리고 자 한다. 전기 에너지가 막 상용화된 초창기에는 전기 에너지를 원하는 형 태로 변환하는 것은 매우 어려운 일이었다. 그러나, 1900년대 중반 이후 반 도체 기술의 발전과 함께 전력 반도체 소자가 발명되면서 적재적소에 맞게 전기 에너지의 형태를 변환할 수 있게 되었다. 현 시점에서 전력 반도체는 고전압 직류 (high voltage DC: 이하 HVDC) 송전 시스템 (transmission system) 과 같은 초대형 전기기기는 물론, 우리가 직접적으로 매일 접하는 중 · 소형 전기/전자기기에도 빠짐없이 들어있다. 그러나, 전력 반도체는 수 십 년간의 발전을 거듭한 끝에 그 성능이 이론적인 한계치에 도달하고 있 는 상태이다. 따라서, 최근에는 종래의 실리콘 (Si) 기반 복합물 반도체 (compound semiconductor) 가 아닌, 탄화규소 (SiC) 및 질화갈륨 (GaN) 기반의 전력 반도체가 새롭게 각광받고 있다[1,2]. 지금까지 소개된 전력 반도체는 기본적으로 전압이나 전류와 같은 전기 신호 (electrical signal) 를 통해 전력의 on-off 스위칭 (switching) 동작을 구현하고 있다. 이처럼

- 1 -

전기 신호를 통해 스위칭 동작을 수행하는 전력 반도체는 모니터링 및 스 위칭을 위해 부가적인 회로 (auxiliary circuit) 와 보조 전원이 필요하며, 고전압 또는 대전류로 인한 전자기 간섭 (electromagnetic interference: 이 하 EMI) 에 의해 오작동이 발생할 가능성이 내재되어 있다. 이러한 문제 점을 해결하기 위하여 광 신호 (optical signal) 를 통해 스위칭 동작을 수 행할 수 있는 광 게이팅 (optical gating) 방식의 전력 반도체가 제안되었 다[3]. 상용화 된 대표적인 제품으로는 독일 인피니온 (Infineon) 사의 빛으 로 트리거링 가능한 사이리스터 (light triggered thyristor: 이하 LTT) 가 존재한다. 이러한 LTT들은 수광부에 특정 파장의 빛을 조사 (illumination) 함으로써 수백 A 이상의 전류를 트리거링 할 수 있으나, 종래의 사이리스 터에 비해 고비용이므로 높은 신뢰도를 요구하는 일부 HVDC 송전 시스템 등에만 사용되고 있다.

지금까지 소개된 대다수의 전력 반도체들은 기본적으로 PN 접합 (junction) 을 기반으로 하는 복합물 반도체이다. 반면에, 단일 물질에 단일 층 (single layer) 로 이루어진 산화물 반도체 (oxide semiconductor) 를 이 용해서도 새로운 전력 반도체를 제작할 수 있다. 그 중에서 대표적인 산화 물 반도체 중 하나인 바나듐 이산화물 (vanadium dioxide: 이하 VO₂) 을 이용하여 빛으로 제어 가능한 새로운 전력 반도체를 제작하려는 시도가 지 난 수년간 이루어져 왔다[4-6]. 지속적인 연구를 거듭하여 초기 연구보다 높은 성능을 이끌어낼 수 있었지만, 앞서 언급한 상용 제품에 비해서는 여 전히 성능이 부족한 편이다. 또한, 연구가 고도화되면서 반복 실험을 기반 으로 하는 기존의 연구 방식으로는 쉽사리 성능 향상을 꾀하기 어려운 상 황에 도달하였다. 따라서, 본 연구에서는 우선 실험을 통해 VO₂ 박막 기반 전류 스위칭 소자의 여러 특성과 실험적 성능 한계를 조사하고, 상용 소프 트웨어를 이용해 소자를 모델링하고자 한다. 그리고, 모델링 된 VO₂ 소자

- 2 -

를 이용하여 실험으로는 분석이 어려웠던 다양한 조건에 따른 전류 스위칭 동작을 수치해석적인 방법 (numerical method) 으로 시뮬레이션 (simulation) 하고, 소자의 스위칭 성능에 영향을 주는 구성 요소들을 분석 하여 최적의 전류 스위칭 성능을 얻을 수 있는 조건을 확인하고자 한다.



Ⅱ. 이론적 배경 및 선행연구

2.1. 바나듐 이산화물 (VO₂)





앞서 언급하였던 바나듐 이산화물, 즉 VO₂는 본 연구의 핵심이 되는 산 화물 반도체이다. 일반적으로 전자 소자를 포함한 각종 응용처에서는 VO₂ 를 덩어리 (bulk) 형태가 아닌 박막 (thin film) 형태로 사용하므로, 본 연 구에서도 이제부터는 VO₂ 박막에 초점을 맞추도록 하겠다. VO₂ 박막은 특 정한 임계온도 (critical temperature) 인 ~68 ℃를 기준으로 가역적인 (reversible) 상전이 (phase transition) 를 보이는 강상관계 (strongly correlated material) 물질이다[7]. VO₂ 박막의 상전이는 온도 이외에도 압 력[8], 빛[9, 10], 전기장[11, 12] 등 다양한 외부 자극에 의해 발생시킬 수 있다. <그림 2-1>은 VO₂ 박막의 온도 대 저항 특성과 상전이 전후의 결 정 구조 변화를 간략하게 보여주고 있다[13]. VO₂ 박막은 상온에서는 절연

- 4 -

체 상태 (insulating state) 에 가까운 전기 저항을 띄며, 이때는 온도가 조 금 변화하여도 전기 저항은 크게 변하지 않는다. 그러나, 절연체 상태의 박 막을 계속 가열하여 온도를 상승시킬 경우 부성 미분 저항 (negative differential resistance: 이하 NDR) 특성에 의해 전기 저항이 감소하면서 금속성 (metallic state) 을 띄게 된다[14]. 온도가 충분히 상승하여 VO2 박 막의 임계온도를 넘어서게 되면 단사정계 (monoclinic) 였던 VO2 박막의 결정 구조가 정방정계 (tetragonal) 로 바뀌는 구조적인 상전이 (structural phase transition) 가 발생하고, 전기 저항이 급격하게 감소한다. 실제로 VO2 박막의 상전이 과정에는 중간에 여러 상 (phase) 이 있는 것으로 밝 혀졌으나[15], <그림 2-1>과 같은 선명한 특성 변화를 관찰하기 위해서는 완전한 구조적인 상전이가 요구된다. 예를 들어, VO2 박막에 약한 전기장 (electric field) 을 인가하거나 약한 빛을 조사하여 여기 (excitation) 시킬 경우에도 상전이가 일어나 전기 저항 등에서 변화가 발생하지만[9-12], 구 조적인 상전이에 비해서는 미약한 수준의 변화만을 관찰할 수 있다. 또한, VO2 박막은 전기 저항 이외에도 상전이 전후로 적외선 대역의 광학 투과 율도 크게 변화한다[16]. 이처럼 다재다능한 VO2 박막을 이용하여 전기 스 위치[11, 12] 이외에도 광학 스위치[16], 발진기 (oscillator) [17-19], 적외선 감지기 (microbolometer) [20, 21], 스마트 윈도우[22], 저항 메모리 소자 (resistance memory device) [23-25] 등으로 응용한 연구들이 지난 수년간 보고되었다.

VO₂ 박막에서 상전이가 발생하는 이유를 밝혀내기 위한 연구는 지난 수 십 년간 응집물질물리학 (condensed matter physics) 분야의 주요한 난제 였으나, 현재에 이르기까지도 그 이유를 명쾌하게 아우르는 단일 이론은 밝혀지지 않았다. 여전히 논란은 남아있지만 모트 금속-절연체 전이 (Mott metal-insulator transition), 파이얼스 전이 (Peierls transition), 그리고 전

- 5 -

하 전달 거동 (charge transfer behavior) 에 관한 이론이 VO₂의 상전이를 설명하기 위한 주요한 이론으로 받아들여지고 있다[15, 26-29]. 그러나, 본 연구에서는 이미 실험적으로 명확히 밝혀진 온도에 의한 VO₂의 상전이 특 성만을 심도 있게 응용할 것이므로, VO₂ 박막의 상전이의 기원 (origin) 과 근본적인 원리에 대한 언급은 여기서 마무리 짓고자 한다.

2.2. VO2 박막 기반 2단자 평면형 전자 소자

이전 문단에서 설명한 바와 같이 VO₂ 박막은 상전이를 전후로 전기 저 항이 크게 변화하는, 즉 비선형적인 전류-전압 (*I-V*) 특성을 보여준다. 만 약, 적절한 형태로 가공된 VO₂ 박막에 바이어스 (bias) 전압을 인가하고, 외부에서 물리적인 자극을 주어 상전이를 제어할 수 있다면 박막에 흐르는 전류를 제어할 수 있을 것이다.

<그림 2-2> VO2 박막 기반 2단자 소자의 (좌) 평면도와 (우) 단면도



<그림 2-2>는 2단자 평면형 소자 (two-terminal planar device) 형태로 가공된 VO₂ 박막 기반 스위칭 소자의 구조도를 보여주고 있다. 박막 양단 에 형성된 금속 전극 (electrode) 을 통해 소자에 바이어스 전압을 인가할 수 있으며, 노출된 VO₂ 박막부에 레이저 (laser) 등을 조사하여 직접 광학 적인 자극을 줄 수 있도록 설계되었다. 만약 여기에서 집속된 고출력 레이 저 펄스를 노출된 VO₂ 박막에 조사한다면, 광열 효과 (photothermal effect) 에 의해 박막부의 온도가 상승하므로 상전이 현상을 유도할 수 있 다[30]. 즉, 여기서 소자에 조사되는 레이저는 일반적인 3단자 소자의 게이 트 단자 (gate terminal) 와 같은 역할을 하는 셈이다. 지난 수년간 보고되 었던, 빛으로 VO₂ 박막에 흐르는 전류를 제어하기 위한 선행연구들 또한 <그림 2-2>와 유사한 구조의 소자를 사용하였다.

2007년에 발표된 연구에서는 VO₂ 소자에 조사되는 적외선 광 (infrared light) 의 파워를 조절하여 전계유도 상전이 (electric-field-induced phase transition) 가 발생하는 문턱 전압 (threshold voltage) 을 조절할 수 있었다[4]. 특정한 바이어스 전압이 인가된 VO₂ 소자에 빛을 조사하여 문턱 전압을 낮춤으로써, 더 낮은 전압에서도 전계유도 상전이를 일으킬 수 있었다[5]. 다음으로, 2014년에는 이전과 유사한 VO₂ 소자에 중심파장이 1550 nm인 레이저 다이오드 (laser diode: 이하 LD) 를 여기 광원으로 사용하여 최대 10 mA의 양방향 전류 스위칭 (bidirectional current switching) 을 구현하였다[6]. 여기서 양방향 전류 스위칭이란 상온에서 절연체 상태인 VO₂ 소자에 레이저가 조사되면 절연체 상태에서 금속 상태로의 상전이가 일어나 소자에 높은 전류가 흐르고, 레이저 조사가 중단되면 반대로 금속 상태에서 절연체 상태로의 상전이가 발생하여 소자에 흐르는 전류가 차단 되는 동작을 의미한다. 전술한 선행연구들은 VO₂ 박막 기반 전류 스위칭 소자의 실현 가능성을 보여주었다는 점에서 큰 의미를 지니지만, 통전전류 및 스위칭 대조비 (switching contrast) 등과 같은 성능 지수가 너무 낮다

- 7 -

는 한계점을 지니고 있었다. 여기서, 스위칭 대조비란 온-상태 (on-state) 전류와 오프-상태 (off-state) 전류 사이의 비율로 정의된다. 초기의 연구 들에서 이처럼 낮은 스위칭 성능이 나타난 이유는 VO₂ 박막에 상전이를 일으키기 위한 수단으로 열이 아닌 순수한 빛과의 상호작용을 주로 이용하 였기 때문이다[4-6]. 앞서 2장 1절에서 설명한 바와 같이 VO2 박막은 열이 아닌 빛의 여기에 의해서도 상전이가 발생할 수 있다[9, 10], 이러한 VO2 의 특성에 착아하여 초기의 연구들은 광 여기 (photoexcitation) 를 이용하 전류 스위칭을 구현하였다. VO2 소자를 자극시키는 레이저의 출력이 수십 mW 정도로 낮을 경우에는 주로 광 여기 효과에 의해 VO2 박막 내 전도 성 캐리어 (conduction carrier) 가 증가한다. 그러나, 여기되는 빛의 파워 가 증가할수록 광 여기 효과보다 광열 효과의 영향이 커지기 시작하며, 결 국 전도성 캐리어는 대부분 광열유도 상전이 (photothermally-induced phase transition) 에 의해 증가하게 된다 [31]. 그러므로, 광 여기 효과를 이용한 초기 연구들은 응답 속도는 빠르지만 VO2 박막에 완전한 구조적인 상전이를 일으킬 수 없었다. 즉, 절연체 상태인 VO2 박막이 레이저 자극을 받아도 충분히 저항이 감소하지 못하였고 이는 곧 스위칭 성능의 저하로 이어졌다. 이후, 더 높은 스위칭 성능을 얻을 수 있도록 VO2 박막 기반 전 자 소자에 수 와트 (watt) 의 집속된 레이저 빔을 조사하여 양방향 전류 스위칭을 구현한 연구들이 발표되었다[30, 32-36]. 집속된 고출력의 레이저 빔이 VO2 소자에 조사되면 광열 효과에 의해 순식간에 박막부의 온도가 상전이 온도 이상으로 가열되므로, 온도에 의한 구조적인 상전이가 일어나 면서 크고 뚜렷한 저항 변화가 발생한다. 광열유도 상전이 기반의 양방향 전류 스위칭은 광 여기 효과를 이용한 연구에 비해 응답 속도는 느리지만 훨씬 향상된 통전전류와 동시에 크게 높아진 스위칭 대조비를 구현할 수 있었다.

바꼬너드	최대전류	스위칭	최소 펄스 폭	최대 반복률
필표전도	[mA]	대조비	[ms]	[Hz]
2014 [6]	10	~68.2	5000	0.1
2015 [30]	10	~3333	100	2.0
2015 [32]	20	~ 7067	100	3.0
2016 [33]	30	~8333	50	4.0
2018 [34]	50	~ 11905	100	4.0
2019 [35]	60	~9530	75	5.0
2020 [36]	30	~7295	30	8.0

<표 2-1> VO₂ 박막 기반 전자 소자에서 레이저를 이용한 양방향 전류 스위칭을 구현한 선행연구들의 스위칭 성능 요약

<표 2-1>은 2014년 이래로 지금까지 발표된 선행연구들의 스위칭 성능
안각략하게 정리한 것이다. 이 표에서 최소 펄스 폭은 VO₂ 박막에 상전
이를 일으켜 소자를 온-상태로 만들기 위한 레이저의 가장 짧은 온-상태
펄스 폭 (pulse width) 을 의미한다. 만약 펄스 폭이 이보다 짧다면 VO₂
박막에 상전이가 일어나지 않거나 간헐적으로 일어나 안정적인 전류 스위
칭이 불가능해진다. 그리고, 최대 반복률 (repetition rate) 은 안정적인 양
방향 전류 스위칭이 가능한 가장 빠른 레이저 펄스 반복률을 의미한다. 그
러므로 반복률이 너무 빠를 경우 안정적인 양방향 스위칭이 이루어지지 못
한다. <표 2-1>에서 명확히 확인할 수 있듯이 저출력의 레이저 빔을 사용
해 스위칭을 구현한 2014년의 연구[6]와 달리, 2015년의 연구[30]는 상대적
으로 크게 향상된 스위칭 대조비 및 최소 펄스 폭, 최대 반복률을 얻을 수
있었다. 그 이유는 2015년 이래로 이루어진 연구들이 모두 접속된 고출력
레이저 빔을 통한 광열유도 상전이 기반의 스위칭을 구현하였기 때문이다.
그 이후로도 더 높은 성능을 얻기 위한 연구가 지속되었고, 정밀한 광학

- 9 -

정렬 (optical alignment) 과 함께 다양한 구조의 소자가 제작되고 시험되 었다. 그 덕분에 VO2 박막 기반 전류 스위칭 소자의 성능은 지속적으로 크게 향상될 수 있었다. 그러나, 2018년 이후 보고된 VO2 소자 기반 양방 향 전류 스위칭 관련 연구들은 그 성능 향상 폭이 이전보다 줄어들기 시작 하였다. 2019년의 연구[35]는 직전의 연구[34]보다 최대 통전전류가 ~20% 상승하였으나 스위칭 대조비가 ~19.9% 하락하여 전류 특성 측면에서는 실질적인 성능 향상을 얻지 못했다. 그 대신 더욱 최적화 된 광학계를 통 해 스위칭에 필요한 레이저의 최소 펄스 폭을 줄일 수 있었고, 양방향 전 류 스위칭이 가능한 최대 반복률도 ~25% 향상되어 직전 연구 대비 차별 점을 얻을 수 있었다. 마지막으로, 2020년에 보고된 연구[36]는 직전의 연 구[35]와 비교하였을 때 최대 통전전류가 절반으로 떨어졌고 스위칭 대조 비는 ~23.5% 감소하여 전류 특성 측면에서는 오히려 성능이 하락하였다. 그러나, 이 연구에서는 기존과는 다른 특수한 구조로 설계된 소자를 이용 하였고, 그 덕분에 광열유도 상전이 기반의 전류 스위칭을 구현한 선행연 구들 중에서는 가장 높은 스위칭 반복률을 달성할 수 있었다[30, 32, 34, 35]. 그리고, 소자 구조의 변화와 반복률 향상 간의 관계에 대한 열역학적 인 분석을 함께 제시하여 앞으로의 연구가 나아갈 방향을 밝혀주었다는 점 에서 의미를 가진다.

2.4. 기존 연구의 문제점 및 본 연구 목적

앞서 소개한 바와 같이 수년간의 연구를 통해 레이저로 제어 가능한 VO₂ 박막 기반 전류 스위칭 소자의 성능은 크게 향상되었다. 그러나, 최근 몇 년 사이에 보고된 연구들에서는 스위칭 성능이 점차 포화 (saturation) 지점에 가까워졌고 성능 향상의 폭도 줄어들기 시작하였다. 레이저를 통한

광열유도 상전이 기반의 VO2 소자의 전류 스위칭 기법은 근본적으로는 열 을 이용한 구동 방식이다. 따라서, 소자의 열 특성 (thermal characteristic) 이 스위칭 특성과 직결된다. 레이저로 소자를 가열하여 온-상태로 만드는 과정과 달리, 온-상태의 소자가 다시 오프-상태로 되돌아오는 과정은 순전 히 수동적인 냉각 (passive cooling) 방식에만 의존한다. 즉, 소자를 빠르게 가열하기는 쉽지만 빠르게 식히는 것은 쉽지 않다는 물리적인 제약이 존재 하다. 그렇기 때문에 스위칭 동작 과정에서 발생되고 방출되는 열을 고려 하여 적절한 절충점을 찾을 필요가 있다. 통전전류가 높아지면 전류에 의 한 줄 (Ioule) 열도 함께 높아지며, 레이저의 펄스 폭 및 반복률이 증가하 면 소자에 전달되는 레이저 빔의 평균 파워 (average power) 도 증가한다. 이렇게 증가된 열은 레이저가 오프-상태일 때 소자가 스스로 식어 상온으 로 돌아가는 것을 방해한다. 설사 소자가 어느 정도 식어 오프-상태로 돌 아갔다고 하더라도 잔열 (residual heat) 에 의해 높아진 오프-상태 온도는 스위칭 대조비를 악화시킨다. 즉, 3가지의 주요 스위칭 성능 지수인 최대 통전전류, 스위칭 대조비, 그리고 최대 반복률을 동시에 모두 향상시키는 것은 불가능하다는 근본적인 트릴레마 (trilemma) 가 존재한다. 가장 최근 의 연구에서는 이전까지 큰 향상을 얻을 수 없었던 반복률을 향상시켰으 나, 그에 대한 반대급부로 최대 통전전류 및 스위칭 대조비가 감소하였다 [36]. 이러한 연구 결과들은 기존의 연구 방식이었던 반복적인 실험만으로 는 더 이상 큰 성능 향상을 꾀하는 것이 어렵다는 사실을 알려주고 있다.

다수의 연구를 통해 VO₂ 소자가 성장된 기판 (substrate) 이 스위칭 특 성과 큰 연관이 있다는 사실은 경험적으로 알 수 있었다. 앞서 소개한 선 행연구들의 상당수는 VO₂ 박막을 성장시키기 위해 직경이 2인치인 사파이 어 (sapphire) 기판을 사용하였다[30, 32, 34, 35]. 넓이가 1 mm² 이하인 VO₂ 박막보다 훨씬 큰 넓이와 질량을 가지는 사파이어 (Al₂O₃) 기판은 레 이저를 이용한 스위칭 과정에서 발생한 열을 방출하는 1차적인 방열판 역 할을 하였다. 기판을 포함한 여러 스위칭 조건들을 다양하게 바꾸어가며 정량적으로 분석한다면 최적화된 VO₂ 소자 및 스위칭 조건을 결정할 수 있을 것으로 예상된다. 이를 위해서는 서로 다른 면적의 기판에 동일한 물 성을 지니는 VO₂ 소자를 제작할 필요가 있는데, 동일한 기판에서 동일한 공정으로 제작된 VO₂ 소자조차도, 제작 공정의 현실적인 한계로 인해 조 금씩 다른 물성을 가진다. 그리고, 스위칭 조건 변화에 따른 소자의 열 특 성을 확인하려면 소자의 위치별 온도 변화를 시간에 따라 알아낼 필요가 있다. 그러나, 온도를 측정해야 할 여러 지점 중 하나인 VO₂ 박막은 온도 측정을 위한 센서 헤드 (sensor head) 인 열전쌍 (thermocouple) 보다 작 으므로 온도 측정이 매우 어렵다. 또한, 측정해야할 온도 변화 자체가 수십 ms라는 너무 짧은 시간 내에 급격하게 일어나기 때문에 일반적인 장비로 는 제대로 된 측정 자체가 불가능하다는 문제점이 함께 존재한다.

따라서, 본 연구에서는 수치해석적인 방법을 통해 실험으로는 불가능하 였던 다양한 조건 변화에 따른 스위칭 특성을 분석하고자 한다. 우선, 종래 의 연구와 동일한 구조의 VO₂ 소자를 제작하여 기초적인 특성을 조사하 고, 제작된 소자를 이용하여 한계에 가까운 전류 스위칭을 실험적으로 구 현하고자 한다. 이 실험을 통해 시뮬레이션을 위한 소자를 모델링할 때 사 용할 경계 조건 (boundary condition) 을 확보하고, 모델링 된 소자를 이용 해 기판 크기, 열 접촉 조건, 레이저 파워, 그리고 VO₂ 박막 크기와 같은 다양한 변수에 변화를 주어가며 시뮬레이션을 수행할 것이다. 궁극적으로 는 시뮬레이션 결과를 바탕으로 하여 VO₂ 박막 기반 전류 스위칭 소자로 부터 최적의 스위칭 성능을 얻을 수 있는 주요 조건들을 열역학 (thermodynamics) 적인 관점의 분석을 포함하여 확인할 것이다.

- 12 -

Ⅲ. 전류 스위칭 실험 및 결과

3.1. VO2 소자 제작 및 특성 조사



<그림 3-1> 제작된 VO₂ 박막 기반 전자 소자의 X선 회절 패턴과 평면 위에서 촬영한 광학 현미경 사진 (내부 그림)

VO₂ 박막 기반 전자 소자를 제작하기 위하여 우선 2인치의 사파이어 기 판 상에 VO₂ 박막을 펄스 레이저 증착 (pulsed laser deposition: 이하 PLD) 기법을 통해 성장시켰다. PLD 기법은 다른 방법에 비해 상대적으로 공정 과정이 복잡하지만, 뛰어난 내구성을 가지는 고품질의 박막을 제조할 수 있다. 높은 결정성을 가지는 고품질 박막을 제조하기 위해 기판의 온도 를 650 °C로 조절하였으며, PLD 챔버 (chamber) 내의 산소 분압은 32 mTorr로 세밀하게 제어하였다. 성장된 박막의 평균 두께는 ~100 nm로 측정되었다. <그림 3-1>은 성장된 박막의 X선 회절 (X-ray diffraction: 이하 XRD) 패턴을 보여주고 있다. 40° 및 86° 부근에 나타난 2개의 산 (peak) 은 각각 VO₂ 박막의 (020) 및 (040) 평면에 해당하며, 단사정계 (monoclinic) 구조를 가진 VO₂의 존재를 확인시켜준다. 41° 및 91° 부근에 나타난 강한 세기의 산 2개는 각각 사파이어 기관의 (0006) 및 (00012) 평 면을 나타낸다. 이 결과를 통하여 VO₂ 박막이 기관에 잘 증착되었음을 확 인할 수 있었다. 다음으로, 사파이어 기판 전체에 넓게 증착된 박막을 2단 자 소자 형태로 가공하기 위하여 이온 빔 밀링 (ion beam milling) 을 통 해 박막을 식각 (etching) 하여 전류 채널 (current channel) 을 형성하였 다. 이후, 식각된 VO₂ 박막 양단에 포토리소그래피 (photolithography) 공 정을 통해 Ti 및 Au로 구성된 전극을 형성하였다. <그림 3-1>의 내부 그 림은 완성된 VO₂ 박막 기반 2단자 소자를 평면 위에서 촬영한 광학 현미 경 사진을 보여주고 있다. 제작된 소자에서 VO₂ 박막 패치 (patch) 의 크 기는 과거 선행연구와 동일한 500 × 500 µm²이었다[34, 35].

여기서 박막 패치의 크기는 다음과 같은 여건을 고려하여 선정되었다. 너무 작은 소자에서 큰 전류를 흘릴 경우 높은 전류 밀도 (current density) 로 인해 소자의 온도가 크게 올라가므로 소자가 파괴되거나 안정 적인 양방향 스위칭이 불가능하다는 문제가 존재한다. 반면에, 소자가 너무 큰 경우에는 레이저 빔을 박막 크기에 맞게 집속시켜도 광 세기 (optical intensity) 가 낮아 레이저를 통한 가열 (laser heating) 에 상대적으로 오 랜 시간이 소요되어 즉각적인 광열유도 상전이를 일으킬 수 없다. 그러므 로 너무 작지도 크지도 않은 적절한 크기의 소자가 필요한데, 과거 경험을 통해 VO₂ 박막 패치의 크기가 100 × 100 µm²이상이고 1000 × 1000 µm²이 하인 소자가 실험에 적합하다고 판단하였다[30, 32-36]. 집속된 근적외선

- 14 -

레이저 빔은 낮은 타원율을 가지는 타원형이기 때문에, 빔이 VO₂ 박막을 완전히 덮기 위해서는 VO₂ 박막이 정사각형 형태로 식각될 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 실험에 사용할 VO₂ 소자의 박막 크기를 500 × 500 μm²로 설계하였다.

<그림 3-2> 제작된 VO₂ 소자의 온도에 따른 전류-전압 특성과 상온에서 측정한 더 넓은 전압 범위의 전류-전압 특성 (오른쪽 내부 그림) 및 저항-온도 특성 (왼쪽 내부 그림)



<그림 3-2>는 제작된 소자의 I-V 특성을 측정하여 로그 스케일 (logarithmic scale) 로 나타낸 모습이다. 소자의 I-V 특성 측정에는 소스 미터 (sourcemeter, Keithley 2410) 를 사용하였으며, 과전류에 의한 소자 손상을 방지하기 위하여 제한 전류 (compliance current) 는 100 mA로 설 정하였다. 여기서 흑색 원형 기호는 제작된 소자가 상온에 있을 때 측정한 결과이며, 오렌지색 사각형 기호는 소자를 90 °C까지 가열한 후 충분한 시 간 뒤에 측정한 결과를 나타낸다. 이 결과로부터, 제작된 소자는 일정 수준

이상의 바이어스 전압을 인가하여도 상온 상태에서는 전류가 거의 흐르지 않음을 알 수 있다. 그러나, 소자의 온도가 상전이 온도 이상으로 충분히 올라갈 경우 낮은 바이어스 전압 하에서도 높은 전류가 흐른다. 이는 외부 온도 상승에 의해 VO2 박막 내에 존재하는 절연성 그레인 (grain) 이 금속 성 그레인으로 바뀌기 때문이다. <그림 3-2>의 오른쪽 내부 그림은 제작 된 VO₂ 소자의 저항-온도 (*R-T*) 곡선을 보여주고 있다. 이 곡선에서 적색 사각형 기호와 청색 원형 기호는 각각 소자를 가열하면서. 그리고 가열된 소자를 냉각하면서 전기 저항을 측정한 결과를 가리킨다. 본 실험 결과로 부터 알 수 있듯이 소자의 온도가 ~68 ℃ 부근일 때 급격한 저항의 감소, 즉 온도에 의한 절연체-금속 상전이가 발생함을 알 수 있다. 이는 사파이 어 기판에 성장된 VO2 박막의 전형적인 상전이 온도이다. 그러므로, 소자 의 온도를 외부에서 적절히 제어할 수 있다면 소자의 저항을 제어할 수 있 고, 이는 소자에 흐르는 전류를 제어할 수 있음으로 귀결된다. R-T 곡선 측정 실험으로부터, 상온 부근에서 ~1.37 ΜΩ이었던 소자의 전기 저항은 임계 온도 이후인 ~90 ℃ 에서 ~71.7 Ω로 측정되었으며, 최대 저항 변화 량은 ~1.91 × 10⁴ 로 계산되었다. 이 결과는 본 소자를 통해 얻을 수 있는 최대 스위칭 대조비의 상한선이 ~1.91 × 10⁴ 임을 의미한다. 실제로 레이 저를 이용한 전류 스위칭 시에는 레이저 펄스의 반복률이 높아짐에 따라 소자에 열이 누적되고, 이 때문에 오프-상태 저항이 상승하게 되므로 이보 다 더 낮은 스위칭 대조비만을 얻을 수 있다.

마지막으로 <그림 3-2>의 왼쪽 내부 그림은 상온의 소자를 더 넓은 전 압 범위에 대해 전류-전압 특성을 측정한 것으로, 바이어스 전압이 270 V 까지 인가되어도 소자에 흐르는 전류는 매우 미약하였다. 따라서, 제작된 소자의 항복 전압 (break-over voltage) 은 적어도 270 V보다 클 것으로 추측된다. 이처럼 높은 항복 전압은 VO₂ 박막의 전극 사이 간격 (<그림

- 16 -

3-1>의 내부 그림에 표시된 L) 이 넓었기 때문에 얻어질 수 있었다. 예를 들어, 전국 사이의 간격 L이 짧은 소자일 경우 훨씬 낮은 전압에서 항복 전압이 나타날 수 있다. 또한, 소자에 걸리는 전압이 계속해서 높아져서 문 턱 전압을 넘어선다면 레이저 조사 없이 전압만으로 전계유도 상전이가 발 생할 수 있다. 그러나, 이 경우에는 비록 제한 전류가 설정되어 있다고 하 더라도 너무 높은 전압으로 인해 소자가 파괴될 수 있다. 그러므로 너무 작은 소자는 앞서 언급한 높은 전류밀도에 의한 열 특성뿐만이 아니라 전 기적인 특성에서도 대면적 소자보다 스위칭 안정성에 불리한 점을 가진다.

3.2. 실험 셋업 구성

<그림 3-3> VO₂ 박막 기반 전자 소자에서 근적외선 레이저 펄스를 사용하여 양방향 전류 스위칭을 구현하기 위한 실험 모식도와 제작된 VO₂ 소자의 구조도 (내부 그림)



<그림 3-3>은 출력광의 중심파장이 976 nm인 근적외선 LD를 사용하여 사파이어 기판에 성장된 VO₂ 박막 기반 전자 소자에서 양방향 전류 스위

칭을 구현하기 위한 실험 모식도를 보여주고 있다. 사용된 LD (K976AABRN-27.00W) 에는 다중모드 광섬유 (multi-mode optical fiber) 가 부착되어 있으며, 광섬유 끝단에서의 최대 출력은 ~23.5 W로 측정되었 다. 광 출력은 다용도 파워미터 (power meter, Thorlabs PM100D) 와 열 파워 센서 헤드 (thermal power sensor head, Thorlabs S314C) 에 의해 측정되었다. LD의 제어에는 최대 1 kHz 까지 직접 변조 가능한 구동 드라 이버 (VueMetrix Vue-MV-12-02) 를 사용하였다. LD에서 출력된 빛은 광섬유 직진기 (fiber collimator) 와 추가적인 집속용 비구면 렌즈로 구성 된 광섬유 집속기 (fiber focuser) 로 입사된다. 광섬유 직진기 (Thorlabs F220APC-980) 에 내장된 비구면 렌즈의 1/e² 빔 직경 (beam diameter) 및 빔 발산각 (full-angle beam divergence) 은 입사되는 빛의 중심파장이 980 nm 일 때 각각 ~2.4 mm 및 ~524 urad 이었다. 그리고 렌즈의 개구수 (numerical aperture) 와 유효 초점거리 (effective focal length) 는 입사광 의 파장이 980 nm 일 때 각각 0.25 및 ~11.16 mm 이었다. 광섬유 집속기 의 출력단에 부착된 추가적인 비구면 렌즈 (Thorlabs A280TM-B) 의 개 구수, 유효 구경 (clear aperture), 유효 초점거리는 입사광의 파장이 980 nm 일 때 각각 0.15, 5.50 mm, 그리고 18.53 mm 이었다.

LD에서의 출력이 ~23.5 W 일 때 광섬유 집속기에서 출력되는 빛의 최 대 파워는 렌즈간의 결합손실 등에 의해 ~20.1 W로 측정되었다. VO₂ 소 자에 집속된 레이저 빔을 정확하게 조사하기 위하여, 광섬유 집속기와 VO₂ 소자의 위치 조절에는 이동 스테이지를 사용하였다. 그리고 빔 직경 을 ~609 µm로 맞추어 집속된 빔이 소자 표면을 충분히 덮을 수 있도록 이동 스테이지를 정밀하게 조절하였다. 또한, 빔이 VO₂ 소자의 표면에 수 직에 가깝게 입사될 수 있도록 광섬유 집속기의 각도를 조절하였다. 집속 된 빔에 의해 소자가 파괴되는 것을 예방하기 위하여, 사전 실험을 통해

- 18 -

적절한 광 출력을 결정하였다. 광섬유 집속기에서 출력되는 빔의 최대 파 위가 ~9.32 W가 되도록 구동 드라이버를 조절하였고, 이 때 소자 표면에 서의 광 세기 (optical intensity) 는 빔의 출력과 직경을 고려하였을 때 ~ 3200 W/cm²로 계산되었다. 소자에 흐르는 전류의 과도 응답 (transient response) 측정에는 바이어스 전압 V_S의 인가를 위해 앞서 사용된 소스미 터와, 제작된 VO₂ 소자, 그리고 일반적인 탄소피막저항 (carbon film resistor) 을 직렬로 연결한 간단한 전기회로를 사용하였다. 회로에 흐르는 전류는 저항기에 걸리는 전압을 오실로스코프 (Tektronix TDS2022C) 로 측정한 후 저항 값으로 나누어 구하였다.

3.3. 실험 결과 분석

<그림 3-4> 0에서 10 V까지 순차적으로 중가하는 바이어스 전압과 주기적으로 점멸하는 레이저 펄스가 인가된 VO₂ 소자에 흐르는 전류의 과도 응답



<그림 3-4>는 제작된 VO₂ 소자에 인가되는 바이어스 전압 V_S를 0에서 10 V까지 0.1 V 단위로 증가시키며, 동시에 주기적으로 점멸하는 레이저

펄스를 조사하였을 때 소자에 흐르는 전류의 과도 응답을 측정한 결과이 다. 이 측정에서는 외부 저항 소자 없이 VO2 소자와 소스미터만을 직결하 여 사용하였고 제한 전류는 100 mA로 설정하였다. 그리고 소자에 조사되 는 적외선 레이저의 광 세기는 ~3200 W/cm²이었고, 레이저 펄스의 온-상 태 펄스 폭 및 반복률은 각각 200 ms 및 1.0 Hz이었다. 고출력의 집속된 레이저 펄스가 소자에 조사되면 광열 효과에 의해 소자의 온도가 순식간에 임계 온도 이상으로 상승하여 소자에는 큰 전류가 흐르게 된다. 레이저가 조사되는 영역은 사과이어 기판에 비해서 매우 좁은 영역이기 때문에 레이 저 조사가 중단되면 소자는 빠르게 식으면서 다시 절연체 상태로 돌아가고 흐르던 전류도 차단된다. <그림 3-4>와 같이 레이저 펄스 조사가 시작된 직후부터 다양한 전류에 대해 앙뱡향 전류 스위칭이 가능하였다. 특히, 7.3 V ≤ V_S < 8.7 V 범위인 녹색 영역에서는 최대 100 mA의 양방향 전류 스위칭이 가능하였다. 그러나, 황색 영역으로 표시한 V_S ≥ 8.7 V 영역에 서는 레이저 조사가 중단되어도 소자가 오프-상태로 돌아오지 못하는 비 가역적인 (irreversible) 전류 스위칭만 가능하였다. 그래프에는 완전히 나 타나지 않았지만 레이저 조사가 완전히 중단된 이후에도 소자는 스스로 오 프-상태로 돌아가지 못하였다. 그 이유는 높은 전압과 전류에 의한 발열, 그리고 상대적으로 긴 온-상태 펄스 폭으로 인해 소자에 누적된 열 때문 으로 추측된다. 그러므로, 100 mA의 온-상태 전류는 사파이어 기판에 성 장된 VO₂ 소자 (500 × 500 μm²)에서 광열유도 상전이 기반의 양방향 전 류 스위칭을 구현하기 위한 상한선에 가까운 것으로 판단된다. 실험 결과 와 같이 100 mA의 양방향 전류 스위칭이 가능한 전압 범위는 넓지 않은 데, 만약 여기서 전압이 조금만 더 상승한다면 비가역적인 스위칭만 가능 할 것이다. 물론, 양방향 스위칭의 안정성은 조사되는 레이저의 펄스 폭 및 반복률과도 밀접한 관계를 가지고 있으므로 각각의 변수들을 조절하여 조 금 더 높은 온-상태 전류를 얻는 것도 가능하다. 혹은, 소자에 열전 냉각장 치 (thermoelectric cooler) 등을 이용하여 직접적인 냉각을 하거나, 더 넓 은 면적의 소자를 사용하여 열 특성을 개선한다는 선택지도 있다. 그러나, 앞서 설명한 바와 같이 이보다 더 넓은 면적의 소자는 레이저를 이용한 가 열에 더 높은 레이저 파워와 긴 시간이 소요된다는 단점이 있다. 그리고, 펄스 반복률을 더 낮추어도 증가시킬 수 있는 최대 온-상태 전류는 그렇 게 크지 않을 것으로 예상된다.



<그림 3-5> 반복률이 1.0 Hz이고 온-상태 펄스 폭이 각각 (a) 50, (b) 75, (c) 100, 그리고 (d) 150 ms인 레이저 펄스를 VO₂ 소자에 조사하였을 때 전류의 과도 응답

<그림 3-5>는 소자 표면에서의 광 세기가 ~3200 W/cm² 일 때 레이저 펄스의 반복률이 1.0 Hz이고 온-상태 펄스 폭이 각각 50, 75, 100, 그리고
150 ms 일 때 제작된 소자에 흐르는 전류의 과도 응답을 나타낸다. 본 측 정에는 <그림 3-3>에 나타낸 전기회로를 이용하였으며, 직렬로 연결된 탄 소피막저항의 저항값은 10 오, VS는 8.4 V로 설정하였다. 여기서 VS는 소자 에 최대 100 mA가 흐를 수 있도록 <그림 3-4>의 결과와 사용된 외부 저 항 (10 오) 을 고려하여 결정되었다. 모든 측정에서 제한 전류 또한 100 mA로 설정되었다. <그림 3-5(a)>에 나타난 것처럼 소자에 조사되는 레이 저 펄스의 온-상태 펄스 폭이 50 ms인 경우에는 스위칭이 간헐적으로 일 어나지 않거나, 스위칭이 되더라도 전류가 종종 100 mA에 도달하지 못하 는 불안정한 모습을 보여주었다. 반면에 <그림 3-5(b)>와 같이 온-상태 펄스 폭이 75 ms 이상인 경우에는 안정적으로 양방향 전류 스위칭 동작이 가능하였다. 따라서, 제작된 VO₂ 소자에서 적외선 레이저를 이용해 안정적 인 양방향 전류 스위칭 동작을 일으키기 위한 최소 펄스 에너지는 ~600 mJ로 계산되었다. 이 결과는 앞서 계산하였던 광 세기 (~3200 W/cm²) 와 소자의 VO₂ 박막 면적 (500 × 500 µm²), 그리고 펄스 폭 (75 ms) 을 곱하 여 도출되었다.

<그림 3-6>은 소자에 조사되는 레이저 펄스의 반복률을 각각 0.1, 0.5,
1.0 그리고 2.0 Hz로 다양하게 바꾸어가며 측정한 전류의 과도 응답을 보 여주고 있다. 레이저의 온-상태 펄스 폭은 모두 100 ms로 동일하게 설정 하였으며, 소자 표면에서의 광 세기는 이전과 마찬가지로 ~3200 W/cm²로 조절하였다. 본 측정에서도 직전의 실험과 동일한 전기회로와 외부 저항 (10 Ω) 및 V_S (8.4 V) 가 사용되었으며, 제한 전류는 100 mA로 설정되었 다. 그 결과, 시험된 네 종류의 반복률에 대해 모두 최대 100 mA의 양방 향 전류 스위칭이 가능하였다. 그러나, <그림 3-6(d)>와 같이 펄스 반복률 이 2.0 Hz인 경우에는 스위칭 횟수가 늘어남에 따라 소자가 오프-상태에 도달하는 데에 걸리는 시간이 길어지는 것을 확인할 수 있다. 오프-상태로 돌아가는 시간은 계속해서 증가하지 않고 일정 수준에서 수렴하였다. 이보

- 22 -

다 더 오랜 시간 수행된 실험에서도 양뱡향 전류 스위칭은 가능하였다. 하 지만 반복률을 3.0 Hz로 더 상승시켰을 경우에는 초반에만 몇 회의 양방향 스위칭이 가능하였으며, 이후에는 스스로 오프-상태로 돌아오지 못하였다. 본 실험 결과를 통해 제작된 소자에서 얻을 수 있는 최대 반복률은 2.0 Hz 로 도출되었다. 시험된 반복률에 대한 평균 오프-상태 전류는 ~8.41 μA로 측정되었고 평균 스위칭 대조비는 ~11890으로 평가되었다. 이는 근적외선 레이저를 이용해 50 mA의 전류 스위칭을 구현한 이전 연구의 스위칭 대 조비와 비슷한 수준이다[34]. 본 연구에서는 스위칭 대조비의 열화를 최대 한 억제하면서도 2배 더 높은 온-상태 전류를 구현할 수 있었다.



특히, 반복률이 2.0 Hz 일 때의 오프-상태 전류는 ~12.7 µA로 높았는

데, 이는 1.0 Hz 이하의 반복률 실험 결과에 비해 크게 열화된 값이었다. 마지막으로, 모든 반복률에 대해 전류의 평균 상승 시간 (rise time) 과 하 강 시간 (fall time) 은 ~30 및 ~72 ms로 각각 측정되었다. 상승 시간은 과거 연구와 큰 차이가 없었으나[34, 35], 하강 시간은 크게 상승하였다. 또 한, 상승 시간은 펄스 반복률에 관계없이 거의 일정하였지만 하강 시간은 큰 의존성 (dependence) 을 보였다. 스위칭 대조비의 사례와 유사하게 반 복률이 2.0 Hz 일 때는 하강 시간이 급격하게 상승하였다. 2.0 Hz에서의 평균 하강 시간은 133 ms였으며 수십 번의 스위칭 동작 후에는 종종 ~ 250 ms까지 증가하기도 하였으나 대부분은 ~210 ms에서 수렴하였다. 레 이저 펄스 폭 100 ms와 전류의 응답 시간을 고려하면 반복률이 2.0 Hz 일 때 1회의 스위칭에 걸리는 시간은 최대 ~350 ms가 소요될 수 있다. 그러 므로, 앞서 언급한 것과 같이 이보다 더 짧은 주기인 333 ms를 가지는 3.0 Hz의 반복률에서는 양방향 전류 스위칭이 불가능하다. 본 실험 결과들을 통해 유추하여보면, 최대 온-상태 전류 100 mA와 2.0 Hz의 반복률은 제작 된 VO2 소자에 내재된 성능을 한계치에 가깝게 이용한 것으로 파악된다. <그림 3-4>의 결과는 100 mA의 온-상태 전류가 상한선에 가깝다는 것을 알려주고 있고, <그림 3-6>의 실험으로부터 반복률이 상승할수록 스위칭 대조비와 응답 속도가 크게 악화되는 것을 알 수 있었다. 과거 연구들을 참고해보면 온-상태 전류를 약간 더 낮춘다고 하더라도 반복률을 획기적 으로 향상시키기는 어려울 것이다. 마지막으로, 양방향 전류 스위칭의 안정 성 테스트를 위해 레이저 펄스의 반복률과 펄스 폭을 0.5 Hz 및 100 ms로 고정시킨 후 30분 동안 스위칭 동작을 수행하였으며, 측정된 응답에서 주 목할 만한 변화는 관찰되지 않았다.

Ⅳ. VO2 소자 모델링 및 시뮬레이션

4.1. VO2 박막 기반 전자 소자 및 실험환경 모델링

3장에서는 VO2 박막 기반 전자 소자를 제작하여 최대 100 mA의 양방향 전류 스위칭을 구현하였고, 이 결과는 제작된 소자의 최대 성능에 가깝다 는 것을 확인하였다. 상전이 현상의 제어에 광열 효과를 사용하는 VO2 소 자의 전류 스위칭 특성은 결국 소자의 열 특성에 의해 결정된다. 그러므로, 전류 스위칭 성능을 향상시키기 위해서는 스위칭 성능을 악화시키는 원인 을 파악하고, 해당 원인을 제거하거나 보완할 수 있도록 소자의 구조를 변 경할 필요가 있다. 이를 위해서는 소자 제작 시 발생하는 여러 변인들을 통제하면서 다양한 구조의 특성을 시험해야 하는데, 앞서 2장에서 설명한 바와 같이 실험적인 방법으로는 VO2 소자의 열 특성을 면밀히 조사하는 것이 불가능에 가깝다. 그러므로, 소자를 모델링하여 수치해석적인 방법으 로 접근하는 것이 합리적인데, 3장에서 수행하였던 실험을 이론적으로 분 석하기 위해서는 다양한 물리 현상을 동시에 고려할 필요가 있다. 우선 열 원 (heat source) 은 레이저를 통한 광열 효과에 의한 열과, 소자에 전류가 흐르면서 발생하는 줄 열이 존재한다. 그리고, 발생한 열은 대부분 박막과 전극을 따라 기판으로 전도 (conduction) 되어 소산 (dissipation) 된다. 이 과정들은 짧은 시간차를 가지면서 동시에 일어나며, 물질에 따라 온도 의 존성을 포함한 여러 변수들을 가지기 때문에 수기로 계산하는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서, 본 연구에서는 상용 소프트웨어인 COMSOL Multiphysics (이하 COMSOL) 를 사용하여 VO₂ 소자를 3차원 (3D) 으로 모델링하고, 각종 조건들을 다양하게 바꾸어가며 시뮬레이션을 수행하기로

- 25 -
하였다. COMSOL은 서로 다른 물리 현상 사이의 상호작용 (interaction) 을 동시에 고려한 강력한 수치해석 기능을 지원하므로 본 연구에 적합하다 고 판단하였다.

<그림 4-1> COMSOL로 모델링 된 기판 크기가 45 × 45 mm²이고 VO₂ 박막 크기가 500 × 500 µm²인 2단자 소자의 중심부를 확대한 모습과 전체 모습 (내부 그림)



<그림 4-1>은 3장의 실험에서 사용된 VO₂ 소자의 물리적 특성을 바탕으로 하여 COMSOL 상에서 3D로 모델링 된 VO₂ 소자의 모습을 나타낸다. VO₂ 소자를 구성하는 3가지 주요 요소는 VO₂ 박막, 금속 전극, 그리고 사파이어 기판이다. 기판의 정 가운데에 길이 및 폭이 500 µm인 VO₂ 박막 패치가 배치되어 있고, 그 양옆에 길이가 2.5 mm, 폭이 3.0 mm인 금속 전 극이 위치하고 있다. VO₂ 박막의 두께는 100 nm, 그리고 전극의 두께는 130 nm로 정의하였다. <그림 4-1>의 내부 그림은 소자를 확대하지 않은 전체 모습을 나타낸다. 기판은 한 변의 길이가 45 mm인 정사각형 형태에 두께가 430 µm인 사파이어 재질이며, 기판 가운데에는 VO₂ 박막과 전극이

배치되어있다. 각 요소들의 크기와 위치 관계는 <그림 3-1>의 내부 그림 에 나타낸 VO₂ 소자와 동일한 값으로 정의하였다.



<그림 4-2> 모델링 된 VO₂ 박막의 온도-비저항 곡선 (좌) 및 입사되는 빛의 파장이 976 nm 근방일 때의 온도별 광 흡수율 (우)

광학적 특성을 포함한 VO₂의 모든 물성을 정확하게 모델링하는 것은 쉽 지 않은 작업이므로, 본 연구에서는 실제로 시뮬레이션에 필요한 물성인 전기적 특성 및 열 특성을 중점적으로 모델링하였다. <그림 4-2>는 모델 링 된 VO₂ 박막에 사용된 가장 중요한 두 특성인 온도에 따른 비저항 (resistivity) 과 광 흡수율 (absorptance) 을 나타내고 있다. 우선, <그림 4-2>의 왼쪽 그림에 나타낸 온도-비저항 곡선은 <그림 3-2>의 내부 그림 의 실험 결과를 바탕으로 가열 곡선 (heating curve) 만을 고려하였다. 이 특성에 의해 온도에 따라 소자에 흐르는 전류가 결정된다. 다음으로, <그 림 4-2>의 오른쪽 그림은 모델링 된 VO₂ 박막의 온도별 광 흡수율을 보 여주고 있다. 이 값은 Currie *et al.*의 연구 결과를 참고로 하여 입사되는 빛의 파장이 976 nm 대역 근방일 경우의 온도별 광 흡수율만 고려하였다 [37]. 그 외에, VO₂ 박막의 비열용량 (specific heat capacity), 열전도도 (thermal conductivity), 그리고 밀도는 Ordonez-Miranda *et al.*의 연구 결 과를 이용하였다[38]. 금속 전극의 재질은 금 (Au) 으로 정의하였고, 물성 은 COMSOL에서 기본적으로 제공되는 값을 그대로 이용하였다. 물질의 기초적인 특성은 측정 환경과 방법에 따라서 동일한 물질을 측정하더라도 약간의 차이가 발생할 수 있으며, 피측정물의 형태가 달라져도 차이가 발 생할 수 있다. 그러므로, 시뮬레이션 대상이 되는 VO₂ 소자의 물성치와 타 연구 그룹이 보고한 물성치에는 약간의 차이가 존재할 수 있다. 본 연구에 서는 올바른 결과를 도출하기 위해 여러 차례의 예비 시뮬레이션을 수행하 였고, VO₂ 박막의 비열용량, 열전도도, 밀도, 그리고 전극의 물성치에서 발 생하는 작은 변동은 시뮬레이션 결과에 큰 변화를 주지 못함을 알 수 있었 다. 반면에, VO₂ 박막의 광 흡수율과, 이후 언급할 사파이어 기판의 열전 도도는 시뮬레이션 결과에 매우 지배적인 영향을 끼쳤기 때문에, 실제 실 험 결과와의 반복 비교를 통해 세밀한 조정이 필요하였다. 그러므로, 정확 한 시뮬레이션 결과를 얻기 위해서는 경계 조건 판단을 위한 실제 실험 결 과가 요구된다.



<그림 4-3> 모델링 된 사파이어 기판의 온도별 비열용량 (좌) 및 열전도도 (우)

<그림 4-3>은 모델링 된 VO₂ 소자를 구성하는 요소 중 하나인 사파이 어 기판의 비열용량과 열전도도를 나타내고 있다. <그림 4-3>의 왼쪽 그 림은 기판을 구성하는 물질인 사파이어의 온도별 비열용량으로 Sin *et al.* 의 연구에 제시된 데이터를 사용하였다[39]. 그리고, <그림 4-3>의 오른쪽 그림에 나타낸 사파이어의 온도별 열전도도는 Cahill *et al.*의 연구 결과 [40]를 바탕으로 하되 실험 결과를 반영하여 일부 조정을 거친 값으로, 시 뮬레이션 전반에 걸쳐 가장 중요한 물성치에 해당한다. 일반적으로 사파이 어의 열전도도는 평균 31.4 W·m⁻¹·K⁻¹와 같은 상수로 취급하는 경우가 많 으나[41], 실제로는 온도에 따라 그 값이 크게 변화하는 함수이므로 이를 정확히 반영해야 올바른 결과를 얻을 수 있다. 그 외의 물성치는 COMSOL에서 기본적으로 제공되는 값을 사용하였다.

모델링 된 VO₂ 소자를 이용해 전류 스위칭 특성을 분석하기 위해서는 시간에 따른 소자 전류의 과도 응답 결과가 필요하다. 이를 위해서는 모델 링 된 VO₂ 소자에 바이어스 전압을 인가하고 레이저 펄스를 조사하여 시 간 종속 (time dependent) 해석을 할 필요 있다. 레이저를 이용한 양방향 전류 스위칭을 시뮬레이션 상에서 구현하기 위해, 실험에 사용된 레이저 및 소자에 인가되는 바이어스 전압을 정의하였다. 실제 실험에서는 소자에 집속된 고출력의 레이저 광을 조사함으로써 광열유도 상전이를 일으킨다. 그러나, 본 시뮬레이션에서는 레이저에 의해 실제로 일어나는 복잡한 물리 현상을 구현하는 것 대신, 레이저가 조사되는 VO₂ 박막 패치 표면의 중심 부에 임의의 펄스형 열원 (pulsed heat source) 이 발생하는 간단한 방식을 사용하였다. 구현된 열원의 파워 (실험에서의 레이저 파워) 는 ~9.32 W, 열원의 직경은 609 µm로 정의하였다. 비록 레이저가 아닌 열원을 이용하 였지만 광열 효과에 의한 에너지 흡수를 실제와 유사하게 반영하기 위하 여, VO₂ 박막 표면에서 생성되는 열원의 유효 파위는 <그림 4-2>의 온도 별 광 흡수율을 추가로 곱하여 결정된다.

이처럼 레이저 대신 열원을 이용하여 VO₂ 소자에서 발생하는 물리 현상 을 근사하게 될 경우, 광열 효과에 의한 상호작용은 실제 현상과 큰 차이

- 29 -

없이 분석이 가능하지만 광 여기 효과와 같이 순수하게 빛과의 상호작용만 으로 일어나는 현상은 전혀 고려되지 않는다. 그럼에도 불구하고 열원을 통한 근사를 하는 구체적인 이유는 다음과 같다. 우선, 광 여기에 의해 VO2 박막 내부에서 일어나는 반도체 레벨의 복잡한 물리현상을 시뮬레이 션으로 구현하는 것이 매우 어렵다는 문제점이 있다. 1장에서 설명한 바와 같이 VO₂는 일반적인 반도체와 달리 PN 접합을 기반으로 하지 않으며, 2 장에서 언급한 바와 같이 VO₂에서 상전이 혀상이 일어나는 구체적인 메커 니즘 (mechanism) 이 명확하게 밝혀지지 않았다. COMSOL에서는 널리 알 려진 여러 반도체 물질과 현상에 대해서는 손쉽게 시뮬레이션이 가능하지 만, 전술한 이유로 인하여 VO2와 같이 특수한 물질 내부에서 일어나는 반 도체 레벨의 상호작용은 시뮬레이션으로 구현하기 어렵다. 과거 타 그룹에 서 발표된 연구 중에서는 열원에 의한 근사를 사용하지 않고 연속파 (continuous-wave) 광원에 의한 상전이 현상을 시뮬레이션으로 구현한 바 가 있다[42]. 여기서는 복소 유전율 (complex permittivity) 과 파동 광학 (wave optics) 을 도입하여 VO2 박막과 빛 사이의 상호작용을 조금 더 정 교하게 모델링하였다. 그러나, 더 복잡한 모델을 사용하였음에도 불구하고 밴드갭 (bandgap) 을 고려한 광 여기 효과는 구현되지 않았고, 최종적으로 상전이는 빛을 흡수한 VO₂ 박막에서 발생한 열에 의해 일어나는 방식으로 구현되었다. 비록 접근 방법에서는 차이가 있었지만, 결과적으로는 본 연구 에서 제시하는 열원에 의한 근사와 큰 차이가 있다고 보기 어렵다. 만약 실험에 사용된 광원의 세기가 충분히 낮다면 광 여기 효과에 의해 발생하 는 VO2 박막의 작은 특성 변화들을 무시하기 어려울 수 있다. 그러나, 본 연구와 같이 집속된 고출력의 광원만을 사용할 경우 VO2 박막에는 광열 효과에 의한 구조적인 상전이가 일어나면서 전기·광학적 특성이 매우 크게 변화한다. 따라서, 광 여기 효과에 의한 약간의 특성 변화는 무시할 수 있 을 정도로 작으므로 간단한 열원을 사용하여 시뮬레이션을 수행하는 것이 효율적이다.

소자에 흐르는 전류는 전극 양단에 인가되는 바이어스 전압에 의해 결정 된다. 절연체-금속 상전이가 일어난 이후 소자에 최대 실험과 동일한 100 mA의 전류가 흐를 수 있도록 전극 양단에 7.203 V의 바이어스 전압을 정 의하였다. 여기서 정의된 값들은 실제 실험 결과와의 비교가 수월하도록 선행연구 및 3장의 실험에서 사용한 값들과 최대한 동일하게 맞추었다.

양방향 전류 스위칭의 관점에서, 열에 의해 온-상태가 된 VO2 소자가 다시 오프-상태로 돌아가기 위해서는 누적된 열이 방출되어 상전이 온도 이하로 떨어져야한다. 소자에 누적된 열이 방출될 수 있는 방법은 공기에 의한 대류 (convection) 및 전도, 그리고 기판을 포함한 주변으로의 전도가 존재한다. 우선, 공기는 열전도도가 매우 낮은 우수한 단열재에 해당하므로 공기에 의한 전도는 고려하지 않았다. 그리고, 외부 공기에 의한 자연 대류 (natural convection) 역시 그 영향이 너무 미미하여 무시할 수 있다. 자연 대류에 의한 영향을 비교하기 위하여 자연 대류 경계 조건의 인가 유무에 따른 예비 시뮬레이션을 각각 수행해보았으나, 양방향 전류 스위칭 특성에 있어서 유의미한 차이점을 발견할 수 없었다. 소자에서 발생하는 열은 대 부분 VO2 박막 주변에 집중되는데, VO2 박막의 표면적 (500 × 500 µm²) 은 매우 좁기 때문에 자연 대류만으로는 원활한 열 방출이 일어나지 않는 다. 그리고, 주변 공기를 포함한 모든 물질의 초기 온도는 실제 실험환경과 유사한 상온으로 설정되어 있다. 따라서, 매우 좁은 VO2 박막 주변을 제외 한 소자 대부분의 영역에서는 외부 공기와의 온도차가 크지 않으므로 자연 대류가 거의 일어나지 않는다. 이러한 이유로 본 연구에서는 효용성이 거 의 없는 자연 대류를 경계조건에서 제외하는 최적화를 통해 시뮬레이션 연 산 시간을 단축하였다. 참고로, 외부 공기에 인위적인 흐름을 주는 강제 대

- 31 -

류 (forced convection) 가 있을 경우 소자의 온도 분포 및 양방향 전류 스 위칭 특성에도 유의미한 영향이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 실제 실험 환경에서도 팬 (fan) 등을 이용해 소자 주변의 공기에 강제 대류를 일으킬 경우 스위칭 성능에 충분히 영향을 끼칠 수 있다는 의미이다. 그러 나, 지금까지 수행된 양방향 전류 스위칭 실험들은 모두 강제 대류를 배제 한 환경에서 이루어졌으므로 앞으로 수행될 본 연구의 시뮬레이션에서도 강제 대류는 고려하지 않을 것이다.

결론적으로, 열원에 의해 VO2 박막에서 발생한 열이 방출될 수 있는 경 로는 기판을 통한 전도가 유일하다고 간주할 수 있다. 만약, 실험이 완전히 단열된 계 (adiabatic system) 에서 이루어진다면 스위칭 동작이 반복됨에 따라 기판의 온도가 지속적으로 상승하며, 낮은 전류와 낮은 펄스 반복률 조건 하에서도 결국 양방향 스위칭이 불가능하게 된다. 그러나, 실제 실험 화경은 단열된 화경이 아니므로 기판의 열이 또다시 방출될 경로가 존재하 며 지속적인 양방향 스위칭이 가능하다. 따라서, 올바른 결과를 얻기 위해 서는 시뮬레이션에서도 실제 실험 환경을 유사하게 구현할 필요가 있다. 실제 실험 환경에서는 VO2 소자가 실험용 이동 스테이지 위에 올려져있으 며, 이동 스테이지는 알루미늄 재질의 블록 (aluminum block) 으로 이루어 져있다. 그러므로, 기판으로 방출된 열은 최종적으로 알루미늄 블록으로 방 출된다. 알루미늄 블록은 기판에 비해 매우 큰 질량과 표면적을 가지기 때 문에 기판에서 열이 전달되어도 유의미한 온도 변화가 발생하지 않는다. 이를 시뮬레이션에 반영하기 위하여 사파이어 기판 아래에 크기는 기판과 같으면서 두께는 기판의 2배인 알루미늄 블록을 배치하였다. 알루미늄 블 록과 기판 사이는 미세한 요철과 공기로 인해 특정한 열 접촉 저항 (thermal contact resistance) 이 존재하므로, 적절한 열투과율 (thermal transmittance) 을 갖는 열 접촉 경계 조건을 설정하였다. 그리고, 알루미

- 32 -

늄 블록의 반대쪽 면 (기판과 닿아있지 않은 면) 에는 항상 온도가 상온 (293.15 K) 으로 유지되도록 경계 조건을 설정하였다.

지금까지 언급된 실험 환경들을 시뮬레이션하기 위해서는 전자기학 및 열역학적인 물리 현상을 동시에 고려해야한다. 박막에 흐르는 전기적인 현 상을 해석하기 위해 COMSOL에서 "AC/DC Module" 내에 있는 "Electric Currents in Shells" 물리 현상을 선택하였고, 각 요소 간의 열역학적인 현 상을 해석하기 위해 "Heat Transfer Module"에 포함된 "Heat Transfer in Solids" 물리 현상을 선택하였다. 마지막으로, 박막에 흐르는 전류에 의한 줄 열과 두 물리 현상 간의 상호작용을 고려하기 위해 "Multiphysics Couplings" 기능에 포함된 "Electromagnetic Heating, Layered Shell" 물리 현상을 사용하였다.

<그림 4-4> 동일한 레이저·열원 펄스 조건에서 실제 실험으로 측정된 소자 전류의 과도 응답 (좌) 및 모델링 된 소자를 이용해 시뮬레이션으로 계산된 소자 전류의 과도 응답 (우)



<그림 4-4>의 왼쪽 그림은 실제로 제작된 VO₂ 소자를 이용해 3장의 실험과 동일한 조건에서 측정한 실제 소자 전류의 과도 응답을 보여준다. 레이저의 온-상태 펄스 폭 및 반복률은 각각 100 ms 및 3.0 Hz로 설정하였다. 실험에 사용된 소자는 안정적인 양방향 전류 스위칭이 가능한 최대 반복률이 2.0 Hz 이었는데, 여기서는 실험과 시뮬레이션 간의 결과 비교가

수월하도록 중간에 양방향 스위칭이 불가능해지는 더 높은 반복률을 일부 러 선택하였다. <그림 4-4>의 오른쪽 그림은 모델링 된 VO₂ 소자를 이용 하여 양방향 전류 스위칭을 시뮬레이션 한 결과로, 열원의 온-상태 펄스 폭 및 반복률을 각각 100 ms 및 3.0 Hz로 실험과 동일하게 설정했을 때 소자에 흐르는 전류의 과도 응답을 보여준다. 이 결과를 통해 시뮬레이션 과 실제 실험 결과가 매우 유사함을 확인할 수 있었고, VO₂ 소자와 실험 환경의 모델링이 올바르게 되었다고 판단하였다. 따라서, 모델링 된 VO₂ 소자를 이용하여 실험으로는 확인이 어려웠던 다양한 조건에 따른 스위칭 특성을 분석하기로 하였다.

4.2. 기판 크기별 전류 스위칭 특성 분석





앞서 모델링 된 VO2 소자와 시뮬레이션 조건을 바탕으로 기판의 크기를

바꾸어가며 소자에 흐르는 전류의 과도 응답과 온도 분포를 조사하였다. 사파이어 기판은 VO2 박막에서 발생하는 열을 방출시켜주는 1차적인 방열 판 역할을 하는 구성요소이다. 다수의 실험을 통해 사파이어 기관이 스위 칭 특성에 큰 영향을 끼친다는 것을 경험적으로 알고 있었으나, 다양한 크 기의 기판을 가지는 VO2 소자의 제작이 쉽지 않았기 때문에 정확한 확인 이 불가능하였다. <그림 4-5>는 모델링 된 소자를 이용하여 COMSOL에 서 시간 종속 시뮬레이션을 수행한 뒤, 몇 회의 스위칭 동작이 이루어진 3 초 부근 지점에서의 공간적 온도 분포를 나타내었다. 여기서 기관의 면적 은 정사각형 형태인 45 × 45 mm²로 정의하였는데, 이는 실제로 제작된 지 름이 2인치인 사파이어 기판의 넓이와 거의 동일하다. 시뮬레이션 시간 범 위는 상황에 따라 변화하나 일반적으로 0에서 30초 이내였다. 그림에서 "beam area"로 표시된 영역은 시뮬레이션 상에서 열원이 발생되는 위치를 지정하기 위해 임의로 만들어진 영역이다. 직관적으로 예상할 수 있듯이. 범이 조사되는 (열원이 위치하는) VO2 박막 부근의 좁은 영역만 온도 변 화가 크게 발생하였으며, 박막의 주변부로 갈수록 온도 변화는 거의 발생 하지 않았다. 즉, 열원이 위치한 박막부의 온도는 크게 상승하였으나 기판 의 전반적인 온도는 거의 변화하지 않음을 알 수 있다.

<그림 4-6>은 모델링 된 VO₂ 소자를 이용해 양방향 전류 스위칭 동작을 시뮬레이션을 했을 때, 소자에 흐르는 전류의 과도 응답을 나타낸 그래 프이다. 기판의 넓이는 45 × 45 mm²를 그대로 유지하였고, 열원의 파워 및 직경은 각각 ~9.32 W 및 609 µm로 정의하였다. 그리고, 실제 실험 결과와 시뮬레이션 결과가 가능한 한 유사하게 나올 수 있도록 몇 차례의 예비 시뮬레이션을 통해 사파이어 기판의 열전도도를 보정하였다. <그림 4-6>을 보면 최대 100 mA의 양방향 전류 스위칭이 15회 이루어졌으나, 그 이후로는 소자가 스스로 오프-상태로 돌아가지 못하였다. 이는 소자에

- 35 -

흐르는 전류와 인가된 열원에 의해 소자의 방열능력을 초과하는 열에너지 가 생성되어, 열원이 오프-상태 일 때도 소자 온도가 상전이 온도 이하로 떨어지는 것을 방해하였기 때문이다.



<그림 4-6> 양방향 전류 스위칭 시뮬레이션을 통해 계산된, 모델링 된 소자에 흐르는 전류의 과도 응답

<그림 4-7>은 소자의 특정 위치별 온도를 시간에 따라 보여주고 있다.
각각 VO₂ 박막 패치 및 전극의 중심부, 기판의 모서리 근방의 온도를 모니터링하였다. 시뮬레이션 조건은 <그림 4-6>과 동일하게 설정하였다.
VO₂ 박막 중심부의 온도를 보면 스위칭 동작이 반복됨에 따라 최대 및 최저 온도가 증가하며, 15회의 스위칭 동작 이후로는 최저온도가 상전이 온도 이상이 되어 소자가 스스로 오프-상태로 돌아가는 것을 방해한다. 스위칭 동작이 계속될 경우 VO₂ 박막의 최저 온도는 계속해서 증가하지는 않고 평형을 이룬다. 그러나, 상전이 온도 이상에서 평형이 유지되므로 소자는 항상 온-상태로 유지되며 스스로 오프-상태로 돌아오지 못한다. 전극의 온도도 VO₂ 박막과 유사한 특성을 보이나, VO₂ 박막에 비해 온도 변동이

적고 더 빠르게 일정 온도로 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 마지막으로, 사파이어 기판의 외곽부에서는 유의미한 온도 상승을 관찰할 수 없었다. VO₂ 박막과 매우 가까운 좁은 영역에서는 <그림 4-5>와 같이 온도 변화 가 발생하겠지만, 스위칭이 오래 반복되어도 기판 전체에 온도 변화를 주 기는 어렵다는 사실을 알 수 있다.



<그림 4-7> 양방향 전류 스위칭 시뮬레이션을 통해 계산된, 모델링 된 소자 내 특정 위치들의 시간별 온도 변화

<그림 4-8>은 사파이어 기판의 크기를 다양하게 변경해가면서 VO2 박 막 중심부의 온도 변화를 시간에 따라 분석한 결과이다. 열원의 온-상태 펄스 폭 및 반복률은 각각 100 ms 및 3.0 Hz로 설정하였다. 그림에서 확 인할 수 있듯이, 기판의 면적이 작아질수록 열 펄스 인가 전후의 온도가 더 높아진다는 사실을 알 수 있다. 소자가 오프-상태로 되돌아가기 위해서 는 열원이 오프-상태일 때 VO2 박막의 온도가 상전이 온도 이하로 떨어져 야한다. 그러나, 기판의 면적이 너무 좁으면 (즉, 질량이 작으면) 질량과 비 열용량의 곱으로 계산되는 기판의 열용량 또한 낮아진다. 그러므로, 동일한 조건의 열원이 인가될 경우 VO₂ 박막을 포함한 기판 전체의 온도를 빠르 게 상승시키게 된다. 그리고, 기판 아래에 놓여 최종적인 방열판 역할을 해 주는 알루미늄 블록과 접촉 면적도 줄어들기 때문에 빠른 열 방출에도 더 욱 불리해진다. 이로 인하여 소자에 누적된 열이 전부 방출되기도 전에 다 음 열 펄스가 인가되어, 결국 소자는 스스로 오프-상태로는 돌아가지 못하 고 계속 온-상태를 유지하게 된다. 반면에, 기판의 면적이 더 커진다면 열 용량과 접촉면적에 여유가 생기면서 기판의 온도 상승이 억제되고, 소자에 남아있는 열이 오프-상태 사이에 더 많이 밖으로 방출될 수 있다. 따라서 더 많은 횟수의 양방향 전류 스위칭이 가능하다.

<그림 4-8> 모델링 된 VO₂ 소자에 펄스 폭이 100 ms이고 반복률이 3.0 Hz인 열원을 인가하였을 때 다양한 기판 면적에 따른 VO₂ 박막 중심부의 온도 변화





<그림 4-8>과 동일한 시뮬레이션 조건에서, 기판 면적별 전류의 과도
응답을 나타낸 <그림 4-9>를 보면 소자의 온도가 전류에 미치는 영향을
더 명확하게 알 수 있다. 사과이어 기관의 면적이 가장 작은 6 × 6 mm²인
경우 스위칭을 개시한지 2초도 되지 않아 스스로 오프-상태로 돌아오지
못하였다. 기판 면적이 10 × 10 mm²일 때에는 6 × 6 mm²인 경우보다 조
금 더 오랫동안 스위칭이 가능하였다. 그러나, 스위칭 동작을 반복함에 따
라 전류가 오프-상태로 돌아오는데 걸리는 하강 시간이 점차 길어지고 있
는 것을 알 수 있다. 즉, 기판의 면적이 넓어짐에 따라 하강 시간도 짧아지
며, 이는 기판의 면적이 클수록 안정적인 스위칭 동작에 더 유리하다는 사
실을 알려준다. 열 펄스가 인가된 후부터 소자에 전류가 흐르는 데까지 걸
리는 시간인 상승 시간의 경우는 기판 면적이 변화하여도 유의미한 차이가

발생하지 않았다. 그 이유는 기판의 면적이 변하여도 VO₂ 박막을 상전이 온도까지 가열하는 데 걸리는 시간에는 큰 차이가 발생하지 않기 때문이 다. <그림 4-8>에서 확인할 수 있듯이 기판 면적과 관계없이 열 펄스가 인가되는 것과 거의 동시에 VO₂ 박막의 온도는 상전이 온도 이상으로 가 열됨을 알 수 있다. 엄밀하게 따질 경우 기판의 면적이 작을수록 더 짧은 상승 시간을 가지지만, 지금보다 더욱 빠른 반복률을 구현하여야 이 차이 가 의미가 있을 것으로 사료된다.



<그림 4-10> 모델링 된 VO₂ 소자에 펄스 폭이 100 ms이고 반복률이 3.0 Hz인 열원을 인가하였을 때 기판 면적별로 분석된 안정적인 양방향 전류 스위칭이 가능한 최대 횟수

<그림 4-10>은 온-상태 전류가 100 mA이고 열원의 펄스 폭 및 반복률 이 각각 100 ms 및 3.0 Hz일 때, 안정적인 양방향 전류 스위칭이 가능한 최대 횟수를 사파이어 기판 면적별로 정리한 결과이다. 붉은색 실선은 각 각의 시뮬레이션 결과를 지수 함수 (exponential function) 에 피팅 (fitting) 한 것이다. 기판의 면적이 가장 작은 6 × 6 mm²인 경우는 스위칭 시작 후 4회까지만 양방향 스위칭이 가능하였다. 그리고 기판의 면적이 가 장 큰 85 × 85 mm²인 경우에는 21회까지 양방향 스위칭이 가능하였다. 즉, 기판이 너무 작을 경우에는 양방향 스위칭이 거의 이루어지지 않지만, 기판의 면적이 조금씩 증가함에 따라 양방향 스위칭이 가능해지는 횟수는 급격하게 증가한다. 그러나, 기판의 면적이 일정 수준에 도달한 이후에는 스위칭 횟수의 증가세가 둔화되는 것을 확인할 수 있으며, 기판의 면적을 계속해서 증가시켜도 결국 포화될 것이라 예상할 수 있다. 정리하자면, 기 판의 면적을 증가시킬 경우 더 향상된 양방향 전류 스위칭 성능을 얻을 수 는 있겠지만 최적의 크기에 도달한 이후에는 유의미한 성능 향상을 얻을 수 없다는 한계점이 존재한다.

기판 크기 증가에 따른 성능 향상에 한계가 발생하는 이유는 다음의 <식 4-1>을 통해 유추해볼 수 있다.

<식 4-1>

여기서 △T는 온도 변화량, Q는 유입되는 열에너지, m은 기판의 질량, c 는 기판의 비열용량을 의미한다. <그림 4-5>에서 확인할 수 있듯이, 대부 분의 열은 기판 크기와 관계없이 열원이 인가되는 VO₂ 박막과 금속 전극 주변에만 집중된다. VO₂ 박막과 전극이 기판과 접촉하고 있는 면적은 기 판 크기가 변해도 일정하기 때문에, 기판으로 전달되는 열에너지 Q는 기판 크기와 관계없이 일정하다. 그러므로 <식 4-1>에 따르면 기판의 질량 m 이 증가할수록 온도 변화는 감소되어야한다. 그러나, 이러한 결과를 얻기 위해서는 기판의 열전도도가 충분히 높다고 가정되어야한다. 실제 사파이 어 기판의 열전도도는 구리나 알루미늄과 같은 금속보다는 훨씬 낮기 때문 에 전달된 열이 기판에 골고루 분산되는 데 일정한 시간이 소요된다. 따라 서, 열 펄스가 인가되는 1주기 이내에 기판의 끝까지 열이 완전히 전달되 지 못할 수 있다. 기판의 크기 (질량) 가 작을 경우에는 열전도도가 낮더라 도 1주기 이내에 기판 전체에 열이 전달될 수 있지만, 넓은 기판에서는 1 주기 이내에 열이 기판 전체에 전달되지 못한다. 이러한 이유로 인하여 기 판의 면적이 일정 수준 이상 증가하면 스위칭 성능 향상에도 포화가 발생 한다. <그림 4-10>의 결과를 보면 기판 크기가 45 × 45 mm² (2025 mm²) 를 초과하면서부터 성능 향상이 폭이 둔화된다. 그러므로, 해당 스위칭 조 건 (열원 특성 및 최대 통전전류) 에서는 45 × 45 mm²의 사파이어 기판이 가장 최적의 크기라고 할 수 있을 것이다. 지금까지의 결과들을 이용하면 최대 통전전류, 반복률 등 양방향 전류 스위칭에 필요한 각종 변수들이 결 정될 경우, 최적의 성능을 얻을 수 있는 기판 크기를 시뮬레이션을 통해 설계하는 것도 가능하다.

4.3. 열 접촉 조건에 따른 전류 스위칭 특성 분석

<그림 4-11> VO₂ 소자와 알루미늄 블록 간의 위치 관계 및 구조를 과장하여 표현한 뒤 측면에서 바라본 단면도 (좌) 및 두 구조물 사이의 접촉부 모식도 (우)



앞서 수행된 시뮬레이션 결과를 통해, VO2 소자에서 광열 효과 기반의

양방향 전류 스위칭을 구현할 경우 기판의 크기가 스위칭 성능에 큰 영향 을 끼친다는 것을 알 수 있었다. 기판의 크기는 소자를 설계할 때 결정되 는 것이므로, 소자가 이미 제작된 이후에는 기판 크기를 변경하는 것이 매 우 어렵다. 그러므로 이미 제작된 VO2 소자의 스위칭 성능을 최적화할 필 요가 있을 경우, 소자의 외적인 요인들을 조절하여야 한다. 스위칭 성능에 큰 영향을 끼치는 외적인 요인 중 하나는 VO2 소자와 소자가 놓인 알루미 뉴 블록 사이의 열 접촉 저항이다. <그림 4-11>의 위쪽 그림은 알루미늄 블록 위에 놓여진 VO₂ 소자의 위치 관계와 구조를 나타낸 것으로, 전체 모습을 한눈에 쉽게 볼 수 있도록 실제 크기와 비율을 무시하고 과장되도 록 표현한 뒤 측면에서 바라본 단면도이다. 4장 1절에서 소자를 모델링 할 때 언급했듯이 알루미늄 재질의 이동 스테이지와 그 위에 놓인 VO2 소자 는 서로 이상적으로 완벽하게 접촉되어 있지 않다. 두 구조물 간에는 <그 림 4-11>의 오른쪽 그림과 같이 미세한 요철로 인한 공극 (air gap) 으로 인해 특정한 열 접촉 저항이 존재하므로 원활한 열전달 (heat transfer) 이 이루어지지 않는다. 만약, 두 구조물 사이에 실버 페이스트 (silver paste) 와 같은 서멀 컴파운드 (thermal compound) 를 도포하여 공극을 줄일 수 있다면 열 접촉 저항을 낮출 수 있으므로 더 높은 스위칭 성능을 기대할 수 있을 것이다. 예를 들어, 기판의 크기가 45 × 45 mm²인 경우 중심부에 서 발생한 열이 기판 끝까지 방사상으로 전도 (radial conduction) 되기 위 해서는 수십 mm의 거리를 이동해야한다. 그러나, 본 연구에서 사용된 사 파이어 기판의 두께는 430 µm이므로 열이 기판의 두께 방향으로 전달될 경우에는 430 um만 이동하면 알루미늄 블록에 도달할 수 있다. 알루미늄 의 열전도도는 사파이어에 비해 매우 높기 때문에 두 구조물 간의 열전달 이 원활하게 이루어질 수만 있다면 소자의 구조를 바꾸지 않고도 스위칭 성능 향상을 꾀할 수 있다.

VO₂ 소자와 알루미늄 블록 사이의 열 접촉 저항을 정확히 모델링하기 위해서는 표면의 거칠기 (surface roughness) 와 관련된 평균 높이와 기울 기를 포함하여 비커스 경도 (Vickers hardness) 등 측정하기 까다로운 수 많은 계수들을 정의해야 한다. 본 연구에서는 이러한 값들을 찾는 대신 더 욱 단순한 모델인 등가의 얇은 저항 층 (equivalent thin resistive layer) 모델을 이용하였다. 이 모델은 4장 1절에서 간단히 언급한 것처럼, 열투과 율 혹은 열전달 계수 (heat transfer coefficient) 라고 불리는 단일 계수를 통해 두 구조물 사이의 열 접촉 조건을 정의할 수 있다. 앞서 수행된 시뮬 레이션에 사용된 기판과 알루미늄 블록 사이의 열투과율은 120 W·m⁻²·K⁻¹ 이었다. 이 값은 다수의 시뮬레이션을 반복하여 실제 실험 결과와 유사한 결과가 나오는 값을 탐색한 끝에 얻은 것이다. 만약, 기판과 알루미늄 블록 사이에 서멀 컴파운드를 도포하여 열 접촉 저항을 낮춘다면 열투과율은 더 상승할 것이다. 반대로, 기판이나 알루미늄 블록의 표면이 더욱 거칠어지는 등 두 구조물 사이에 더 큰 공극이 생긴다면 열 접촉 저항이 커질 것이고 열투과율은 낮아질 것이다.

<그림 4-12>는 VO₂ 소자의 기판과 알루미늄 블록 사이의 열투과율을
다양하게 바꾸어가며 시뮬레이션을 수행한 뒤, 안정적인 양방향 전류 스위
칭이 가능한 최대 횟수를 정리한 것이다. 소자에 흐르는 온-상태 전류는
100 mA, 열원의 펄스 폭 및 반복률은 각각 100 ms 및 3.0 Hz로 정의하였
다. 붉은색 실선은 각각의 시뮬레이션 결과를 지수 함수에 피팅한 것이다.
그 결과, 직관적으로 예상할 수 있듯이 기판과 알루미늄 블록 사이의 열투
과율이 높을수록 (열 접촉 저항이 낮을수록) 더 많은 횟수의 양방향 전류
스위칭이 가능하였다. 열투과율이 선형적으로 증가함에 따라 양방향 스위
칭 횟수는 지수 함수적으로 증가하므로, 두 구조물 사이의 열 접촉 저항을
충분히 줄일 수 있다면 스위칭 성능 향상에 큰 도움을 줄 것으로 예상할

- 44 -

수 있다. 반면에, 두 구조물 사이의 열투과율이 0인 경우와 열투과율이 실 제 실험 환경과 유사한 120 W·m⁻²·K⁻¹인 경우를 서로 비교해보면 단지 38%의 성능 차이만이 발생한 것을 알 수 있다. 즉, 단순히 알루미늄 블록 위에 소자를 올려 두는 것만으로는 두 구조물 간에 원활한 열전달이 이루 어지지 않는다는 의미이다. 이러한 환경에서는 알루미늄 블록이 최종적인 방열판 역할을 거의 하지 못하며, 소자의 스위칭 성능은 대부분 기판의 방 열능력에 따라 결정될 것이다. 또한, 열투과율과 스위칭 횟수 (안정성) 는 지수 함수적인 관계를 가지므로, 두 구조물 사이의 열투과율이 애초에 너 무 낮다면 약간의 열투과율 증가만으로는 충분한 스위칭 성능 향상을 기대 할 수 없을 것이다.

<그림 4-12> VO₂ 소자의 기판과 알루미늄 블록 간의 열투과율에 따라 분석된 안정적인 양방향 전류 스위칭이 가능한 최대 횟수



4.4. 열원 파워에 따른 전류 스위칭 특성 분석

양방향 전류 스위칭을 구현하기 위해 필요한 여러 요소들 중에서 가장 제어하기 쉬운 것은 바로 VO2 박막부에 조사되는 레이저의 파워이다. 레 이저 파워는 소자의 구조는 물론, 실험 장비의 구조를 바꾸지 않고도 쉽게 제어가 가능하다. 따라서, 소자별로 최적의 초기 파워를 선택하기가 매우 용이하며 스위칭 동작이 이루어지는 동안에도 피드백 (feedback) 을 통해 동적으로 파워를 조절하는 것이 가능하다. 빔 크기를 포함한 기타 조건들 이 결정된 상태일 때, 조사되는 레이저 파워가 너무 낮으면 VO2 박막의 온도를 충분히 올리지 못하므로 광열유도 상전이가 제대로 일어나지 않고 스위칭 동작도 이루어지지 않는다. 반면에, 레이저 파워가 너무 높다면 소 자의 방열능력을 초과하는 필요 이상의 열에너지가 전달될 수 있으며. 미 처 빠져나가지 못한 열은 소자에 계속 누적된다. 이 경우 처음에는 스위칭 동작이 이루어지는 것처럼 보이지만, 레이저가 오프-상태가 되어도 누적된 잔열이 소자가 상온으로 돌아가는 것을 방해하므로 결국 양방향 전류 스위 칭 동작을 불가능하게 만든다. 그러므로, 양방향 전류 스위칭을 제어하기 위한 레이저는 안정적으로 광열유도 상전이를 일으킬 수 있는 최소한의 파 워를 선택하는 것이 이상적이다. 3장에서 수행하였던 실험을 통해 제작된 VO2 소자에 광열유도 상전이를 일으킬 수 있는 최소 펄스 에너지를 도출 한 바 있다. 해당 실험에서 레이저 파워는 일정한 값으로 고정된 상태였는 데, 이는 실험에 사용된 VO₂ 소자의 손상을 예방하기 위함이었다. 빔 크기 가 일정한 조건에서 레이저의 파워를 높일 경우 광 세기가 증가하며, 너무 높은 세기의 광 (또는 열) 은 소자를 파괴하게 된다. 그러나, 시뮬레이션에 서는 소자가 파괴될 염려가 없으므로 열원의 파워 (실제 실험에서의 레이

- 46 -

저 파워) 를 더 높게 할 수 있고, 실제 실험으로는 측정하기 어려운 각종 응답들을 쉽게 분석할 수 있다.



<그림 4-13> 모델링 된 VO₂ 소자에 펄스 폭이 100 ms이고 반복률이 2.0 Hz인 열원을 인가하였을 때 열원의 파워에 따른 VO₂ 박막 중심부의 온도 변화

<그림 4-13>은 소자에 인가되는 열원의 파워를 다양하게 변경해가면서 시뮬레이션 했을 때, VO₂ 박막 중심부의 온도 변화를 시간에 따라 보여주 고 있다. 열원의 온-상태 펄스 폭 및 반복률은 각각 100 ms 및 2.0 Hz로 설정하였고, 열원의 직경은 707 µm로 고정하였다. 여기서 열원의 파워가 7.5 W 미만일 경우 VO₂ 박막의 온도가 상전이 온도 이상으로 충분히 유 지되지 못한다는 것을 발견할 수 있다. 열원의 파워가 7.5 W인 경우에는 VO₂ 박막이 상전이 온도 이상으로 가열될 수 있었으나, 완전히 가열되기 위해서는 열원이 온-상태가 된 이후 약간의 시간이 필요함을 확인할 수 있다. 그리고, 열원의 파워가 9 W 이상인 경우 박막부의 온도는 거의 즉각

- 47 -

적으로 상전이 온도 이상으로 상승하였다. 특히, 열원의 파워가 15 W 이상 일 때에는 열원이 온-상태가 되는 즉시 상전이 온도에 도달하였다.



<그림 4-14> 모델링 된 VO₂ 소자에 펄스 폭이 100 ms이고 반복률이 2.0 Hz인 열원을 인가하였을 때 열원의 파워에 따른 소자 전류의 과도 응답

동일한 조건에서 전류의 과도 응답을 나타낸 <그림 4-14>를 보면 열원 의 파워가 전류 스위칭 특성에 끼치는 영향을 더 명확하게 알 수 있다. 열 원의 파워가 7 W 이하인 경우에는 온-상태로의 스위칭 동작 자체가 제대 로 이루어지지 않았으며, 7.5 ~ 8 W 사이인 경우에는 양방향 스위칭 동작 이 이루어졌으나 인가된 열원의 펄스 폭에 비해 너무 짧은 시간 동안만 전 류가 흐를 수 있었다. 이는 열원의 부족한 파워로 인해 소자가 충분히 가 열되는 데 긴 시간이 소요되었기 때문이다. 열원의 파워가 9 ~ 10 W인 경우에는 가장 이상적인 양방향 전류 스위칭 특성을 얻을 수 있었다. 열원 의 파워를 더욱 증가시켜 12 W 이상인 경우에는 빠른 상승 시간을 얻을 수 있었지만 하강 시간도 눈에 띄게 증가하여 전류 펄스가 벌어지는 (broadening) 현상을 확인할 수 있다. 그리고, 이보다도 열원의 파워가 더 증가한 경우에는 열원이 오프-상태가 되어도 소자가 상온으로 돌아가지 못하였고, 결국 양방향 스위칭도 불가능하였다. <그림 4-13>을 보면 열원 의 파워가 21 W일 경우 순간적으로 VO₂ 박막의 온도가 ~450 ℃까지 상 승하는 것을 볼 수 있는데, 만약 이렇게 높은 온도로 반복적인 스위칭을 실제로 수행한다면 VO₂ 박막의 산화 (oxidation) 를 가속시켜 소자가 빠르 게 손상될 수 있다.

<그림 4-15> VO₂ 소자에 인가되는 열원의 파워에 따라 분석된 안정적인 양방향 전류 스위칭이 가능한 최대 횟수



<그림 4-15>는 본 절의 시뮬레이션 결과를 정리한 것으로, 열원의 파워
와 양방향 전류 스위칭의 안정성 사이의 관계를 나타낸 그래프이다. 열원
의 파워가 7 W 이하인 경우에는 아예 스위칭 동작이 이루어지지 않으며,
10 W 이후로는 열원의 파워가 증가함에 따라 양방향 스위칭 동작이 가능
한 횟수가 급격하게 줄어든다. 따라서 모델링 된 소자에서는 열원의 파워

가 8 ~ 10 W인 경우 최적의 성능을 이끌어 낼 수 있다. 본 시뮬레이션은 소자를 포함한 주변 온도가 상온인 경우를 가정한 것이므로 만약 주변 온 도가 달라질 경우 열원의 최적 파워 범위도 달라질 것이다. 예를 들어, 한 겨울의 외기에 소자가 노출 된 환경이라면 레이저 (열원) 파워를 더 높여 야 전류 스위칭이 가능할 것이며, 조금 더 높은 레이저 파워에서도 안정적 인 양방향 스위칭이 구현될 수 있을 것이다.

4.5. 박막 크기별 전류 스위칭 특성 분석

3장 1절에서 언급한 것처럼 VO2 박막의 크기는 소자에 흐를 수 있는 전 류와 밀접한 연관이 있다. 동일한 전류를 흘린다고 가정하였을 때, VO2 박 막 패치가 너무 작으면 높은 전류 밀도에 의한 열로 인하여 소자가 파괴되 거나 양방향 스위칭이 불가능해질 수 있다. 반대로 VO2 박막이 너무 크면 소자에 조사되는 레이저 빔의 직경도 함께 커져야하는데. 너무 큰 빔은 광 세기를 낮추기 때문에 광열유도 상전이가 일어나기 어렵도록 만든다. 광 세기를 유지하기 위해 레이저의 파워를 올린다는 선택지도 있으나, 이를 위해서는 빔 직경이 2배 증가할 시 레이저 파워는 4배나 커져야 하므로 현 실적이지 않다. 지금까지 언급된 문제점들은 VO2 박막 크기에 따른 전류 스위칭 특성을 실험적으로 분석하기 어렵게 만드는 이유이기도 하다. 따라 서, 본 절에서는 소자 중심부에 위치한 VO₂ 박막 패치의 크기에 따른 전 류 스위칭 특성을 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 시뮬레이션 전에 먼저 고려해야할 사항은 박막 크기에 따라 인가되는 열원 (레이저) 의 크기와 파워를 변경할 것인가에 대한 문제이다. 박막 크기에 맞추어 열원의 크기 를 변경하지 않을 경우, 열원보다 VO2 박막이 작은 경우에는 필요 없는 주변부까지 가열하는 비효율적인 상황이 발생하며, 열원보다 박막이 큰 경

- 50 -

우에는 박막 전체를 가열하지 못하므로 상전이가 제대로 일어나지 않는다. 그러므로, 박막 크기에 맞추어 열원의 크기를 조절하는 것이 가장 이상적 이다. 이후 수행될 시뮬레이션에서는 원형의 열원이 정사각형 형태의 박막 을 완전히 덮으면서도 주변부의 가열은 최소화 할 수 있도록 열원 직경을 계속하여 변경하였다. 다음으로, 열원의 파워는 크기가 바뀌어도 동일한 세 기 (intensity) 인 ~3200 W/cm²를 유지할 수 있도록 계속하여 변경하였다. 이 세기는 3장의 실험에서 실제로 사용된 값으로, 본 논문에서는 용어의 통일성을 위해 열원의 세기라고 지칭하였으나 분야에 따라 열 유속 (heat flux) 이라고도 불린다. 만약, 고정된 파워의 열원을 사용할 경우 열원 크 기가 작을 때는 세기가 너무 높아 소자를 파괴할 수 있으며, 열원이 커졌 을 때에는 세기가 너무 낮아져 안정적인 상전이를 일으킬 수 없을 것이다. 이러한 사항들을 고려하여 시뮬레이션을 수행할 VO₂ 박막 패치의 크기, 열원의 직경과 파위는 다음 <표 4-1>과 같이 정의하였다.

<표 4-1> VO₂ 박막 패치의 크기에 따른 양방향 전류 스위칭 특성을 분석하기 위한 시뮬레이션 조건 (열원 세기 고정)

VO ₂ 박막 패치 크기 [µm ²]	열원 직경 [µm]	열원 파워 [W]	열원 세기 [W/cm ²]
25×25	35	0.0308	
50×50	71	0.127	
100 × 100	141	0.500	
250 × 250	354	3.15	3200
500 × 500	707	12.6	
750 × 750	1061	28.3	-
1000 × 1000	1414	50.3	



<그림 4-16> 모델링 된 VO₂ 소자에 동일한 펄스 특성과 세기를 가지는 열원을 인가하였을 때 박막 크기에 따른 전류의 과도 응답

<그림 4-16>은 모델링 된 소자에서 VO2 박막 패치의 크기만을 다양하 게 바꾸어가며 시뮬레이션을 수행한 후, 소자에 흐르는 전류의 과도 응답 을 박막 크기에 따라 로그 스케일로 나타낸 결과를 보여주고 있다. 소자에 인가된 열원의 크기와 파워는 앞서 정의하였던 <표 4-1>과 같으며, 열원 의 온-상태 펄스 폭 및 반복률은 각각 100 ms 및 1.0 Hz으로 모두 동일하 게 고정하였다. 먼저, 박막의 크기가 500 × 500 μm²인 경우를 보면 안정적 인 양방향 전류 스위칭이 잘 이루어지고 있음을 알 수 있다. 앞서 3장의 실험에서 확인하였듯이 VO2 박막 크기가 500 × 500 μm²인 경우에는 인가 되는 열원 (레이저) 의 세기가 3200 W/cm²이면 안정적인 양방향 전류 스 위칭이 가능하다. 그러나, 동일한 광 세기임에도 불구하고 박막 크기가 250
× 250 μm² 이하인 경우에는 소자에 전류가 거의 흐르지 않아 단방향 (unidirectional) 전류 스위칭조차도 불가능하였다. 이와는 대조적으로 박막 크기가 750 × 750 μm² 인 경우에는 양방향 전류 스위칭이 가능하였지만 전류 펄스가 크게 벌어지기 시작하였다. 마지막으로, 박막의 크기가 1000 × 1000 µm² 인 경우에는 초반에는 양방향 전류 스위칭이 가능하였으나, 스위칭 동작을 거듭함에 따라 지속해서 전류 펄스가 벌어져 결국 단방향 스위칭 동작만이 가능하였다.



<그림 4-17> 모델링 된 VO₂ 소자에 동일한 펄스 특성과 세기를 가지는 열원을 인가하였을 때 박막 크기에 따른 중심부의 온도 변화

이러한 특성이 나타나는 이유는 박막 중심부의 온도 변화를 박막 크기에 따라 로그 스케일로 정리한 <그림 4-17>을 통해 알 수 있다. VO₂ 박막 패치의 크기가 250 × 250 µm² 이하인 경우에는 열원이 인가되어도 박막이 상전이 온도 이상으로 가열되지 못하였고, 500 × 500 µm² 이상인 경우에 만 충분히 가열될 수 있었다. 그러나, 박막 크기가 750 × 750 µm² 이상인 경우에는 필요 이상으로 온도가 크게 상승하였고, 너무 높게 상승한 온도 는 제한된 시간 내에 소자가 상온까지 식는 것을 방해하였다. 일련의 결과 들은 안정적인 양방향 전류 스위칭을 위한 최적의 열원 세기 (광 세기) 가 박막 크기별로 다르며, 이는 소자에 전달되는 절대적인 에너지의 총량도 고려해야한다는 사실을 알려준다. 만약, 인가된 열원이 순수하게 VO₂ 박막 만을 가열한다면 동일한 세기의 열원을 사용하여도 박막 크기와 관계없이 유사한 결과를 얻을 수 있을 것이다. 그러나, 실제로는 VO₂ 박막 양옆의 전극과 바로 아래의 기판으로 열이 빠르게 전도되므로, 박막에서 가까운 주변부를 전부 가열해야 VO₂ 박막의 온도도 충분히 상승할 수 있다. VO₂ 박막이 전극·기판과 접촉되는 면적은 박막 크기에 따라 차이가 발생하지 만, 전극과 기판의 크기는 박막 크기에 관계없이 항상 일정하다. 따라서, 박막 크기에 독립적인 주변부를 가열하기 위한 일정량의 에너지가 항상 요 구되므로, 박막 크기가 작아진다고 하더라도 안정적인 양뱡향 전류 스위칭 에 필요한 열원 (레이저) 의 파워를 낮추는 데에는 한계가 존재한다.

VO ₂ 박막 패치 크기 [µm ²]	열원 직경 [µm]	열원 파워 [W]	열원 세기 [W/cm ²]
25 × 25	35	1	968700
50 × 50	371 TH	ot w	235400
100×100	141		59690
250 × 250	354	9.32	9470
500 × 500	707		2374
750 × 750	1061		1054
1000 × 1000	1414		593.5

<표 4-2> VO₂ 박막 패치의 크기에 따른 양방향 전류 스위칭 특성을 분석하기 위한 시뮬레이션 조건 (열원 파워 고정)

마지막으로, 직전에 수행하였던 시뮬레이션과 달리 이번에는 열원의 파 워를 고정한 상태에서 VO₂ 박막의 크기와 열원의 직경만을 바꾸어가며 시 뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용된 VO₂ 박막 패치의 크기, 열원 의 직경과 파워는 <표 4-2>와 같았다. 본 절의 앞부분에서 이미 언급한 바와 같이, 파워가 고정된 상태에서 열원의 직경만이 바뀔 경우 박막 표면 에서의 열원 세기가 너무 높아지거나 낮아지는 상황이 발생한다. 이 중에 서 문제가 되는 부분은 높은 세기의 열에 의해 소자가 완전히 파괴될 수 있다는 점인데, 시뮬레이션을 통하여 소자가 파괴되지 않을 수 있는 열원 파워를 미리 파악하는 것이 가능하다.

<그림 4-18>은 <표 4-2>의 조건으로 시뮬레이션을 수행한 뒤. VO2 박 막 중심부의 온도 변화를 박막 크기에 따라 로그 스케일로 정리한 그래프 이다. 열원의 온-상태 펄스 폭 및 반복률은 각각 100 ms 및 1.0 Hz으로 동일하게 설정하였다. VO2 박막 패치의 크기가 50 × 50 μm^2 이하인 경우 에는 열원의 세기가 너무 강하여 온도가 수천 °C에서 ~11000 °C 부근까 지 상승하는 것으로 계산되었다. 시뮬레이션에서는 소자가 손상되는 것이 고려되지 않았지만, 실제 상황에서는 열원 (레이저) 이 인가되는 즉시 VO2 박막은 물론 그 아래의 기판까지 완전히 손상된다. 박막 크기가 100 × 100 um² 인 경우에는 순간적으로 최대 ~600 ℃ 부근까지 상승하는데, 이는 소자 제작 공정에서 VO2 박막을 성장시키기 위한 기판의 온도와도 유사하 다. 이러한 온도에서 스위칭을 반복할 경우 VO2 박막의 산화를 촉진시켜 소자의 특성이 변질될 수 있다. 또한, 열원이 오프-상태가 되어도 박막의 온도는 상전이 온도 이하로 떨어지지 않았으며 양방향 전류 스위칭도 불가 능하였다. 박막 크기가 250 × 250 μm² 및 500 × 500 μm² 인 경우에는 서 로 간에 응답 시간 및 스위칭 대조비에서는 차이가 발생하였지만 모두 양 방향 전류 스위칭이 가능하였다. 그리고, 박막의 크기가 750 × 750 um² 이 상이 되었을 때는 상전이를 일으킬 수 있는 충분한 에너지가 전달되지 않 아 전류 스위칭 동작이 이루어지지 않았다. 본 절에서 수행된 시뮬레이션

- 55 -

결과들을 통해, 안정적인 양방향 전류 스위칭을 구현하기 위해서는 적절한 크기의 박막과 함께 최적의 레이저 파워를 선택하는 것이 중요하다는 점을 다시 한 번 확인할 수 있었다. 그러나, 외부적 요인인 레이저를 조절하는 것으로는 소자에 내재된 최적의 스위칭 성능을 이끌어내는 것이 한계였으 며, 소자의 근본적인 스위칭 성능을 향상시킬 수는 없었다.

<그림 4-18> 모델링 된 VO₂ 소자에 동일한 펄스 특성과 파워를 가지는 열원을 인가하였을 때 박막 크기에 따른 중심부의 온도 변화



Ⅵ. 결론

5.1. 연구 결과의 요약

본 연구에서는 광열 효과로 제어되는 VO₂ 박막 기반 전자 소자에서의 양방향 전류 스위칭 특성을 심도 있게 분석하였다. 우선, 선행연구를 참고 하여 VO₂ 박막 기반 전자 소자를 실제로 제작한 뒤 실험을 통해 기초적인 소자의 특성과 전류 스위칭 성능의 한계를 조사하였다. 출력광의 중심파장 이 976 nm인 근적외선 LD를 사용하여 접속된 레이저 펄스를 VO₂ 소자 표면에 직접 조사함으로써 다양한 조건에서의 광열유도 상전이를 임의로 일으킬 수 있었다. 그 결과, 100 mA의 양방향 전류 스위칭을 최대 2.0 Hz 의 펄스 반복률로 구현할 수 있었다. 평균 스위칭 대조비는 ~11890으로 평가되었다. 이는 제작된 VO₂ 소자에 내재된 성능을 한계치에 가깝게 이 용한 것으로 파악되었다.

다음으로, 상용 소프트웨어인 COMSOL을 사용하여 실험에 사용하였던 VO₂ 소자의 구조와 전기적·열 특성을 모델링하였다. 그리고, 모델링 된 소자를 이용하여 실험으로는 분석이 어려웠던 다양한 조건에 따른 전류 스 위칭 동작을 수치해석적인 방법으로 시뮬레이션하였다. 올바른 결과를 얻 기 위해 다수의 예비 시뮬레이션을 실제 실험 결과와 비교해가며 반복 수 행하였고, 모델링 된 소자의 주요 물성치들을 세밀하게 조정하였다. 그리 고, 기판 및 박막의 크기, 열 접촉 조건, 열원 (레이저) 파워에 따른 소자의 위치별 온도 변화 및 전류의 과도 응답을 각각 시뮬레이션하여 결과를 분 석하였다. 그 결과, 레이저 파워와 같은 소자 외적인 요소들을 조절하여도 소자의 근본적인 성능을 향상시키는 것은 불가능하였다. 그러나, 소자에 내 재된 성능을 최적으로 이끌어내기 위해서는 소자 구조에 맞는 적절한 값을

- 57 -

선택할 필요가 있었고, 이 값들은 시뮬레이션을 통해 미리 파악할 수 있었 다.

마지막으로, 소자의 근본적인 스위칭 성능은 소자를 구성하는 물질의 특 성과 구조에 의해 결정된다는 것을 확인하였다. 그중에서도 소자의 주요 구성요소 중 하나인 기판이 전반적인 스위칭 성능에 지배적인 영향을 끼쳤 다. 기판의 크기가 증가할수록, 기판과 외부 구조물 사이의 열 접촉 저항이 낮을수록 소자의 방열능력이 향상되어 양방향 전류 스위칭 성능과 안정성 이 증가하는 것을 알 수 있었다. 그러나, 기판의 크기를 증가시켜서 얻을 수 있는 성능 향상에는 한계점이 존재하였고, 이 한계점은 결국 기판 고유 의 물성치인 열전도도와 밀접한 연관이 있다는 사실을 확인하였다.

5.2. 연구의 시사점

본 연구는 VO₂ 박막 기반 전자 소자에서 광열 효과를 이용한 양방향 전 류 스위칭 동작을 다양한 요인에 따라 수치해석적으로 분석할 수 있도록 모델링하였다는 점에 의의가 있다. 과거 타 그룹에서 발표된 연구 중에서 도 VO₂ 박막의 상전이 특성이나 VO₂ 박막 기반 전자 소자의 스위칭 동작 등을 시뮬레이션 한 사례는 있었다[42-46]. 그러나, 해당 연구들은 주로 VO₂ 박막 그 자체의 상전이 현상에 초점이 맞추어져 있었고, 소자를 구성 하는 기판 등의 다양한 요인들에 대한 고려가 부족하였다. 게다가, 사용된 소자의 구조와 실험 환경이 크게 달라 본 연구에서 구현하였던 고출력 레 이저를 이용한 대전류 스위칭 동작을 설명하기에는 적합하지 않았다. 반면 에, 본 연구에서는 높은 스위칭 대조비와 수십 mA 이상의 온-상태 전류를 구현한 실제 실험과 유사한 결과를 얻을 수 있도록 주요한 요인들을 모두 반영하여 소자를 모델링하였다. 이 덕분에 VO₂ 박막과 기판 크기, 소자와 외부 구조물 사이의 열 접촉 저항, 열원의 파워와 같이 실제로 설계 및 조 절이 가능한 다양한 요소들을 시뮬레이션 상에서도 전부 제어할 수 있었 다. 광열 효과로 제어되는 VO₂ 소자의 전류 스위칭 특성을 이처럼 다양한 요인에 따라 수치해석적인 방법으로 분석한 연구는 지금까지 보고되지 않 았다. 그러므로, 본 연구의 결과는 더 높은 성능을 가지면서 다양한 용도에 적합한 VO₂ 소자를 설계하는 데 유용하게 응용될 수 있을 것으로 기대된 다.

5.3. 연구의 한계점과 향후 연구의 방향

VO2 박막 기반 전자 소자에서 광열유도 상전이 기반의 양방향 전류 스 위칭을 구현할 때, 전반적인 스위칭 성능 및 안정성에 지배적인 영향을 끼 치는 요인이 기관의 열전도도라는 것을 본 연구를 통해 확인하였다. 그럼 에도 불구하고 본 연구에서는 기관의 열전도도 변화에 따른 스위칭 특성에 관한 내용을 따로 신지는 않았다. 그 이유는, 열전도도는 물질 고유의 특성 이므로 기관의 크기나 레이저 파워와 달리 근본적으로 물질을 바꾸지 않는 이상 조절할 수 없는 값이기 때문이다. 그리나, 실험에서의 실현 가능성과 는 별개로 시뮬레이션 통해 기관의 열전도도를 바꾸어보는 것은 가능하다. <끄럼 5-1>은 모델링 된 소자에서 VO2 박막의 광 흡수율과 사파이어 기관의 열전도도를 각각 2배 향상시킨 후, 펄스 폭이 30 ms이고 반복률이 20 Hz인 열원을 인기하였을 때 소자 전류의 과도 응답을 시뮬레이션 한 결과이다. 최대 100 mA의 온-상태 전류를 유지하면서 20 Hz의 빠른 스위 칭 동작이 가능하였는데, 반복률 측면에서 괄목할만한 성능 향상이 이루어 졌음을 확인할 수 있다. 만약, 높은 열전도도의 기판을 사용하면서 적절한 광 흡수율을 가지는 VO2 소자를 실제로 제작할 수 있다면 <그림 5-1>과 같이 기존보다 높은 스위칭 성능을 얻을 수 있을 것이다.



<그림 5-1> 모델링 된 소자에서 VO₂ 박막의 광 흡수율과 사파이어 기판의 열전도도를 2배 향상시킨 후 반복률이 20 Hz인 열원을 인가하였을 때 소자 전류의 과도 응답

최근에는 사파이어가 아닌 새로운 물질의 기판에 성장된 VO₂ 박막 기반 전자 소자를 이용하여 광열 효과를 통한 양방향 전류 스위칭을 구현한 사 례가 보고되었다[47]. 이 새로운 소자는 질화 알루미늄 (aluminum nitride: 이하 AIN) 을 버퍼층 (buffer layer) 으로 가지는 실리콘 기판 상에 VO₂ 박막 성장시킨 이종구조 (heterostructure) 로 제작되었으며, 종래의 VO₂ 소자보다 ~10 °C 더 높은 ~78 °C에서 상전이가 일어나는 것으로 측정되 었다[47, 48]. 해당 연구는 아직 초기 단계에 불과하여 다양한 조건 따른 스위칭 동작까지는 시험되지 않았다. 그러나, 종래의 VO₂ 소자와 동일한 방식으로 스위칭이 가능하였으며, 특히 전류의 하강 속도가 매우 빠른 것 으로 나타나 종래의 소자보다 더욱 향상된 방열능력을 가진 것으로 추측된 다. 실제로 실리콘의 열전도도는 상온을 기준으로 사파이어보다 약 4~5배 가량 높은 것으로 알려져 있다[49]. 사파이어의 열전도도를 2배 높여 시뮬 레이션을 수행한 <그림 5-1>의 결과를 감안하면, 이 새로운 소자는 종래 의 소자보다 훨씬 높은 양방향 전류 스위칭 성능을 보여줄 것으로 예상된 다. 향후 연구에서는 AIN/Si 기판에 성장된 이종구조의 VO₂ 소자를 제작 하여 다양한 조건에서 스위칭 동작을 시험하고, 측정된 결과를 바탕으로 소자를 새롭게 모델링하여 시뮬레이션을 수행하고자한다. 이를 통하여 기 존보다 더 높은 스위칭 성능을 실현할 수 있을 것으로 기대하고 있으며, 시뮬레이션을 통해 실험으로는 불가능하였던 다양한 분석과 함께 최적의 성능을 얻을 수 있는 여러 변수도 결정할 수 있을 것이다.


참고 문헌

- J. Rabkowski, D. Peftitsis, H.-P. Nee, "Silicon carbide power transistors: a new era in power electronics is initiated," *IEEE Ind. Electron. Mag.* 6, 17–26 (2012).
- [2] B.J. Baliga, "Gallium nitride devices for power electronic applications," *Semicond. Sci. Technol.* 28, 074011 (2013).
- [3] S. L. Rumyantsev, M. E. Levinshtein, M. S. Shur, L. Cheng, A. K. Agarwal, and J. W. Palmour, "Optical triggering of high-voltage (18kV-class) 4H-SiC thyristors," *Semicond. Sci. Technol.* 28, 125017 (2013).
- [4] 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," *Opt. Express* 15, 12108 (2007).
- [5] 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," *Opt. Express* 17, 19605 (2009).
- [6] B.-J. Kim, G. Seo, and Y.W. Lee, "Bidirectional laser triggering of planar device based on vanadium dioxide thin film," *Opt. Express* 22, 9016–9023 (2014).
- [7] F.J. Morin, "Oxides which show a metal insulator transition at the

Neel temperature," Phys. Rev. Lett. 3, 34-36 (1959).

- [8] E. Arcangeletti, L. Baldassarre, D. Di Castro, S. Lupi, L. Malavasi, C. Marini, A. Perucchi, and P. Postorino, "Evidence of a pressure-induced metallization process in monoclinic VO₂," *Phys. Rev. Lett.* **98**, 196406 (2007).
- [9] A. Cavalleri, C. 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," *Phys. Rev. Lett.* 87, 237401 (2001).
- [10] M. Rini, A. Cavalleri, R.W. Schoenlein, R. López, L.C. Feldman, R.F. Haglund, L.A. Boatner, and T.E. Haynes, "Photoinduced phase transition in VO₂ nanocrystals: ultrafast control of surface-plasmon resonance," *Opt. Lett.* **30**, 558–560 (2005).
- [11] G. Stefanovich, A. Pergament, and D. Stefanovich, "Electrical switching and Mott transition in VO₂," *J. Phys. Condens. Matter* 12, 8837–8845 (2000).
- [12] Y. Zhou, X. Chen, C. Ko, Z. Yang, C. Mouli and S. Ramanathan, "Voltage-triggered ultrafast phase transition in vanadium dioxide switches," *IEEE Electron Device Lett.* **34**, 220–222 (2013).
- [13] B.G. Chae, H.T. Kim, S.J. Yun, B.J. Kim, Y.W. Lee, D.H. Youn, and K.Y. Kang, "Highly oriented VO₂ thin films prepared by sol-gel deposition," *Electrochem. Solid-State Lett.* 9, C12 (2006).

- [14] B.K. Ridley and T.B. Watkins, "The possibility of negative resistance effects in semiconductors," *Proc. Phys. Soc. Lond.* 78, 293 (1961).
- [15] Z. Shao, X. Cao, H. Luo, and P. Jin, "Recent progress in the phase-transition mechanism and modulation of vanadium dioxide materials," NPG Asia Mater. 10, 581–605 (2018).
- [16] S. Zhang, M.A. Kats, Y. Cui, Y. Zhou, Y. Yao, S. Ramanathan, and F. Capasso, "Current-modulated optical properties of vanadium dioxide thin films in the phase transition region," *Appl. Phys. Lett.* 105, 211104 (2014).
- [17] 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," *Appl. Phys. Lett.* **92**, 162903 (2008).
- [18] H.-T. Kim, B.-J. Kim, S. Choi, B.-G. Chae, Y.W. Lee, T. Driscoll, M.M. Qazilbash, D.N. Basov, "Electrical oscillations induced by the metal-insulator transition in VO₂," *J. Appl. Phys.* **107**, 023702 (2010).
- [19] G. Seo, B.-J. Kim, Y.W. Lee, S. Choi, J.-H. Shin, H.-T. Kim, "Experimental investigation of dimension effect on electrical oscillation in planar device based on VO₂ thin film," *Thin Solid Films* **519**, 3383–3387 (2011).

- [20] S. Han, C.H. Chun, C.S. Han, and S.M. Park, "Coupled physics analyses of VO_x-based, three-level microbolometer," *Electron. Mater. Lett.* 5, 63–65 (2009).
- [21] X. Chen, and Q. Lv, "Resistance hysteresis loop characteristic analysis of VO₂ thin film for high sensitive microbolometer," *Optik* 126, 2718–2722 (2015).
- [22] C. Ji, Z. Wu, X. Wu, J. Wang, J. Gou, Z. Huang, H. Zhou, W. Yao, and Y. Jiang, "Al-doped VO₂ films as smart window coatings: reduced phase transition temperature and improved thermochromic performance," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **176**, 174-180 (2018).
- [23] H. Coy, R. Cabrera, N. Sepúlveda, F.E. Fernandez, "Optoelectronic and all-optical multiple memory states in vanadium dioxide," *J. Appl. Phys.* 108, 113115 (2010).
- [24] R. Macaluso, M. Mosca, V. Costanza, A. D'Angelo, G. Lullo, F. Caruso, C. Calì, F. Di Franco, M. Santamaria, F. Di Quarto, "Resistive switching behaviour in ZnO and VO₂ memristors grown by pulsed laser deposition," *Electron. Lett.* **50**, 262–263 (2014).
- [25] J. Kim, K. Park, S. Jo, B.-J. Kim, H.Y. Kang, S.Y. Nam, J. Oh, Y.W. Lee, "Memristive states in vanadium-dioxide-based planar devices stimulated by 966 nm infrared laser pulses," *Jpn. J. Appl. Phys.* 54, 102601 (2015).
- [26] N. F. Mott, "The basis of the electron theory of metals, with

special reference to the transition metals," *Proc. Phys. Soc. A* 62, 416–422 (1949).

- [27] J. Zaanen, G. A. Sawatzky, and J. W. Allen, "Band gaps and electronic structure of transition-metal compounds," *Phys. Rev. Lett.* 55, 418–421 (1985).
- [28] R. M. Wentzcovitch, W. W. Schulz, and P. B. Allen, "VO₂: Peierls or Mott-Hubbard? A view from band theory," *Phys. Rev. Lett.* 72, 3389–3392 (1994).
- [29] 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 J. Phys.* 6, 52 (2004).
- [30] J. Kim, S. Jo, K. Park, B.-J. Kim, Y.W. Lee, "Photo-thermally induced current switching in vanadium-dioxide-based devices using CO₂ laser pumping," *J. Nanosci. Nanotechnol.* **15**, 8484-8488 (2015).
- [31] G. Seo, B.-J. Kim, J. Choi, Y.W. Lee, and H.-T. Kim, "Direct Current Voltage Bias Effect on Laser-Induced Switching Bistability in VO₂-Based Device," *Appl. Phys. Express* 5, 102201, (2012).
- [32] J. Kim, S. Jo, K. Park, H.-J. Song, H.-T. Kim, B.-J. Kim, Y.W. Lee, "20 mA bidirectional laser triggering in planar devices based on vanadium dioxide thin films using CO₂ laser," *Opt. Express* 23, 14234–14244 (2015).

- [33] J. Kim, K. Park, B.-J. Kim, Y.W. Lee, "Bidirectional current triggering in planar devices based on serially connected VO₂ thin films using 965 nm laser diode," *Opt. Express* 24, 17720–17727 (2016).
- [34] J. Kim, S.J. Jeong, B.-J. Kim, and Y.W. Lee, "Photothermally controlled 50 mA gating in VO₂-based planar device using NIR laser diode," *Curr. Appl. Phys.* 18, 127–132 (2018).
- [35] J. Kim, S.J. Jeong, S. Choi, S.-L. Lee, M.S. Kim, D. Kim, B.-J. Kim, and Y.W. Lee, "Laser-Regulated 60 mA Current Switching in VO₂-Based Two-Terminal Device Using 976 nm Laser Diode," *J. Nanosci. Nanotechnol.* **19**, 1620–1625 (2019).
- [36] J. Kim, S. Choi, S.-L. Lee, M.S. Kim, D.K. Kim, B.-J. Kim, and Y.W. Lee, "Bidirectional Current Triggering in VO₂-Based Device with High-Repetition-Rate Pulse Beams Using Near-Infrared Laser Diode," *J. Nanosci. Nanotechnol.* **20**, 351–358 (2020).
- [37] M. Currie, M.A. Mastro, and V.D. Wheeler, "Characterizing the tunable refractive index of vanadium dioxide," *Opt. Mater. Express* 7, 1697–1707 (2017).
- [38] J. Ordonez-Miranda, Y. Ezzahri, K. Joulain, J. Drevillon, and J.J. Alvarado-Gil, "Modeling of the electrical conductivity, thermal conductivity, and specific heat capacity of VO₂," *Phys. Rev. B* 98, 075144 (2018).

- [39] L.T. Sin, W.A.W.A. Rahman, A.R. Rahmat, N.A. Morad, and M.S.N. Salleh, "A study of specific heat capacity functions of polyvinyl alcohol-cassava starch blends," *Int. J. Thermophys.* 31, 525–534 (2010).
- [40] D.G. Cahill, S.M. Lee, and T.I. Selinder, "Thermal conductivity of κ -Al₂O₃ and a-Al₂O₃ wear-resistant coatings," J. Appl. Phys. 83, 5783-5786 (1998).
- [41] E.R. Dobrovinskaya, L.A. Lytvynov, and V. Pishchik, eds.,"Sapphire: Material, Manufacturing, Applications," New York,Springer (2009).
- [42] U. K. Chettiar and N. Engheta, "Modeling vanadium dioxide phase transition due to continuous-wave optical signals," *Opt. Express* 23, 445–451 (2015).
- [43] Y. Zhang, and S. Ramanathan, "Analysis of "on" and "off" times for thermally driven VO₂ metal-insulator transition nanoscale switching devices," *Solid State Electron. Lett.* **62**, 161–164 (2011).
- [44] D. Li, A.A. Sharma, D.K. Gala, N. Shukla, H. Paik, S. Datta, D.G. Schlom, J.A. Bain, and M. Skowronski, "Joule heating-induced metal-insulator transition in epitaxial VO₂/TiO₂ devices," ACS Appl. Mater. Interfaces 8, 12908–12914 (2016).
- [45] L. Pohl, S. Ur, J. Mizsei, "Thermoelectrical modelling and simulation of devices based on VO₂," *Microelectron. Reliab.* **79**,

387-394 (2017).

- [46] A. Velichko, M. Belyaev, V. Putrolaynen, V. Perminov, and A. Pergament, "Thermal coupling and effect of subharmonic synchronization in a system of two VO₂ based oscillators," *Solid State Electron.* 141, 40–49 (2018).
- [47] J. Kim, S. Choi, S.-L. Lee, M.S. Kim, D.K. Kim, B.-J. Kim, and Y.W. Lee, "Bidirectional Current Gating in Two-Terminal VO₂/AlN/Si Heterostructure Device Using 976 nm Laser Diode," *J. Nanosci. Nanotechnol.* 20, 420–426 (2020).
- [48] T. Slusar, J.-C. Cho, B.-J. Kim, S.J. Yun, and H.T. Kim, "Epitaxial growth of higher transition-temperature VO₂ films on AlN/Si," *APL Mater.* 4, 026101 (2016).
- [49] H. R. Shanks, P. D. Maycock, P. H. Sidles, and G. C. Danielson, "Thermal Conductivity of Silicon from 300 to 1400°K," *Phys. Rev.* 130, 1743 (1963).