

금속-절연체 전이 소자와 응용

Metal-Insulator Transition Device and Its Applications

서기완 (G. Seo) MIT 창의연구실 UST 연구생
 김봉준 (B.J. Kim) MIT 창의연구실 선임연구원
 최정용 (J. Choi) MIT 창의연구실 선임연구원
 김성현 (S.H. Kim) MIT 창의연구실 책임연구원
 김현탁 (H.T. Kim) MIT 창의연구실 실장

정보통신 미래원천기술 특집

- I. 서론
- II. 기술 동향
- III. 응용가능한 소자
- IV. 기술 파급 효과
- V. 결론

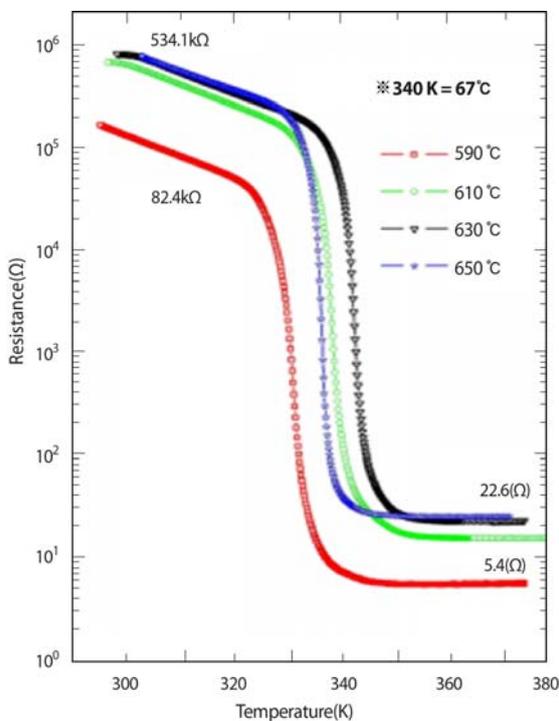
MIT(Metal-Insulator Transition) 물질은 온도와 전기장과 같은 외부자극에 의해 절연체에서 금속으로 전이할 때 전기적 저항이 급격하게 감소하는 물질을 말한다. 그 감소폭은 약 $10^4 \sim 10^5$ 배 정도로 이전에 볼 수 없었던 아주 큰 값이다. 또한 이러한 급격한 감소로 인하여 NDR(Negative Difference Resistance) 같은 현상이 발생하며, 외부에서 주어지는 광학적 에너지에 의하여 전이가 일어나기도 한다. 이러한 여러 현상들을 이용하여 전자소자가 개발되고 그에 따른 응용 분야도 활발하게 연구가 진행되고 있다. 이러한 시도는 MIT 물질의 단독으로 제조된 소자 뿐만 아니라 기존의 전자소자와 병행하여 더욱 시너지를 발휘할 것으로 예측된다. 본고에서는 MIT 현상의 간략한 설명과 현재 기술의 발전 방향, 간단한 응용 소자에 관하여 개괄적으로 기술하고자 한다.

1. 서론

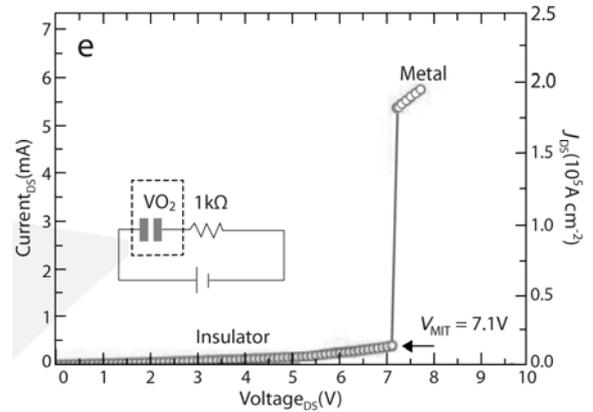
금속-절연체-전이(Metal-Insulator Transition: MIT)는 어떤 절연물질이 특정한 온도 또는 전기장이 되면 절연 특성(반도체적 특성)에서 갑자기 금속 특성으로 변하는 현상을 말한다.

(그림 1)을 보면 상온에서 절연체(반도체)인 이산화바나듐(VO_2)에 온도를 올려주면 67도 근처에서 저항이 급격히 거의 10만분의 1로 감소한다는 사실을 알 수 있다. 이러한 현상이 금속-절연체 전이의 대표적인 특징이며, 이러한 현상 때문에 온도 스위치 등으로의 응용을 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 예를 들어 화재 경보기의 경우 특정한 온도가 되면 경보신호를 올려야 하는데 이런 곳에 사용될 수가 있다.

또한, (그림 2)는 이산화바나듐의 전압에 따른 전류 특성을 보여주고 있다. 낮은 전압에서는 반도체(절연체)와 마찬가지로 기본적으로 밴드 갭이 있는 물리적인 특



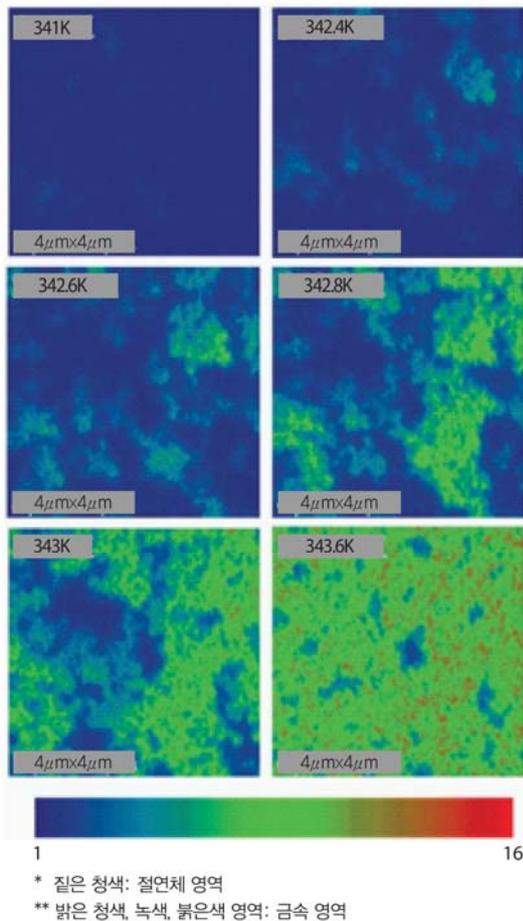
(그림 1) 온도에 따른 VO_2 박막의 저항 변화



(그림 2) VO_2 소자의 전압-전류 특성

성을 가지고 있음)적인 특성을 보이다가 특정 전압(소자 구조와 물질의 상태 등에 의존)에서 갑자기 높은 전류 밀도를 보인다. 이후 전압에 비례하여 전류가 흐름으로써 금속적 특성(에너지 갭이 없음)을 보인다.

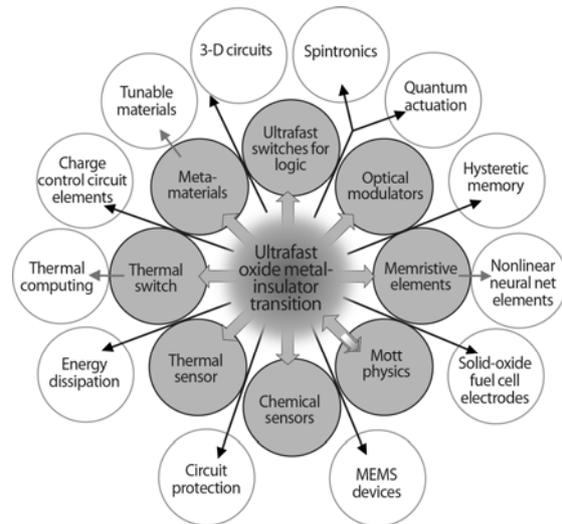
1948년 영국의 물리학자인 Mott(노벨상수상자)가 강상관 전자계(strongly correlated electronic system)에서 급격한(혹은, first-order) 금속-절연체 전이 이론을 발표한 이래, MIT 현상이 강상관 물질에서 실제로 급격하게 일어나는지, 아니면 연속적으로 일어나는지를 규명하는 연구와 MIT 현상이 20세기에 발견된 산화물 고온 초전도체나 거대자기저항 물질 등이 보여주는 핵심물성의 생성원리라도 맞물리면서, 최근까지 가장 중요한 현대 고체물리학의 미제로 남아 있었다. 이러한 문제가 해결된다면, 학문적 발전에 큰 획을 그을 수 있고, 과학기술 분야에도 큰 영향을 미쳐서 새로운 기능소자와 응용 분야 등을 탄생시켜 신성장 산업을 유발할 수 있다. 강상관 전자계 개발 분야에서 Mott의 급격한(first-order) 금속-절연체 전이와 Hubbard의 연속적인 금속-절연체 전이 이론들은 이미 오래 전에 확립되었고 수십 년 동안 학문적인 논쟁은 지속되었지만, 실험적으로 명확하게 증명되지 않았다. (그림 3)을 보면 MIT가 일어날 당시 시료 전체가 동시에 상전이가 일어나는 것이 아니라 어떤 특정한 부분에서 먼저 상전이가 일어나고, 이러한 영역이 전체로 퍼지면서 상전이가 일어나는 것을 볼



(그림 3) 온도에 따른 VO₂ 박막의 MIT 전이 과정을 930cm⁻¹의 주파수에서 측정된 적외선 이미지[1]

수 있다. 이러한 현상은 시료의 불균일성에 의한 것인지 화학적 조성이 달라져서 그런 것인지 정확하게 알려진 것이 없다.

(그림 4)는 MIT 현상이 일어나는 물질을 기반으로 한 다양한 응용 분야들을 보여주고 있다. 예를 들어 2단자 평면 스위칭 소자, 게이트 효과를 이용한 3단자 전자소자, 광학 스위칭 소자, 발진기, 메타물질(metamaterial) 소자, 멤리스티브(memristive) 소자, 온도 센서, 화학 센서 등 다양한 응용처가 있음을 이 다이어그램에서 알 수 있다. 특히 전기-전자 시스템에서 정격신호 전압보다 큰 고속잡음신호는 전원선을 타고 들어와서 전기-전자 시스템을 파괴시킨다. 이 경우에 급격한 금속-절연



(그림 4) MIT 현상을 이용한 전자소자의 응용 분야 개요도

체 전이 현상은 정격신호 이상의 잡음신호를 바이패스 시켜서 전자 시스템을 보호할 수 있다. 전자 시스템에서는 이 소자는 어떤 중요 IC를 지키는 역할도 할 수 있다. 전자 시스템에 대한 잡음제거 시장의 규모는 연간 1억 달러 이상이 된다. 그리고 전기 시스템에서 변전소, 가정용 전기기기, 두꺼비집 등 수많은 곳에 적용이 가능하다. 그 시장의 규모도 계산이 어려울 정도로 막대하다.

핸드폰 및 노트북용 이차전지와 연료전지의 경우 충전상태에서 온도가 상승하면(>100°C) 전지가 부풀어 오르는(폭발) 현상과 전지의 충전 시 과충전 현상을 제대로 해결하기 위하여 급격한 금속-절연체 전기적 jump 현상을 이 분야에 적용하여 문제를 해결하기 위하여 노력하고 있다.

II. 기술 동향

러시아의 Stefanovich 그룹은 ETR의 MIT 연구그룹이 MIT 연구에 사용한 바나듐계 재료를 사용하여 온도에 따른 급격한 금속-절연체 전이를 연구하였다. 미국 Stanford 대학교의 Ovshinsky는 저저항(低抵抗)의 결정상과 고저항(高抵抗)의 비정질상을 이용한 상변환 메

모리(Phase Change Memory: PCM) 연구를 약 30년 전에 처음 수행하였다. 그러나 이것은 온도에 따른 금속-절연체 전이 현상보다 구조 상전이(Structural Phase Transition: SPT) 현상을 이용한 것이다. 외국의 반도체 회사들의 대부분은 상변화 메모리를 연구하고 있다. 상변화 연구는 구조 상전이로 해석되고 있다. 국내에서는 서울대학교, KAIST, UNIST, 이화여자대학교, 포항공과대학교를 비롯하여 국내 연구자들이 학문적으로 연구를 수행해오고 있다.

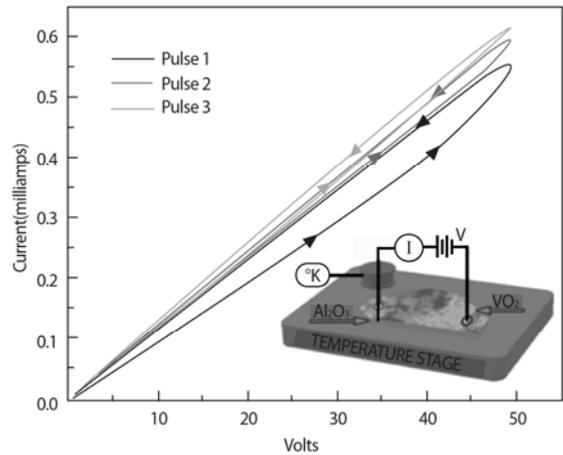
ETRI의 MIT 연구그룹은 전기적 점프를 Mott가 예언한 바와 같이 구조 상전이가 없는 금속-절연체 전이라고 2004년 5월에 New Journal of Physics[2]에 최초로 발표하였다. 이후 MIT 현상을 이용한 응용소자 개발에 주력하고 있으며, MIT 현상규명과 MIT를 이용한 응용소자 개발을 위해서 세계적으로 많은 연구그룹이 활발하게 연구하고 있다.

III. 응용 가능한 소자

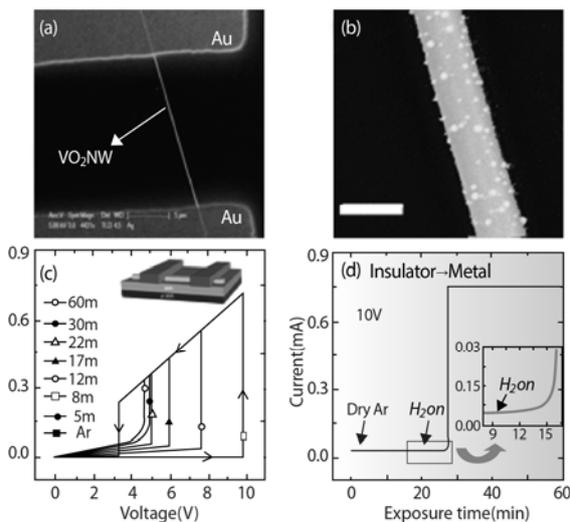
MIT 현상을 나타내는 물질은 그 독특한 전기적 특성을 활용하여 여러 가지 응용소자를 제작할 수 있다. (그

림 5)는 VO₂ nanowire를 이용한 가스 센서 개략도를 나타낸 것이다. 가스의 종류나 양에 따라 금속 절연체 전이에 해당하는 전압이 달라져 가스를 검출하는 원리이다. MIT의 독특한 전류-전압 특성과 VO₂ nanowire를 이용하였다는 점에서 가스 센서의 일반적인 문제인 선택성과 감도 문제를 해결할 수 있는 제안으로 받아들여지고 있다.

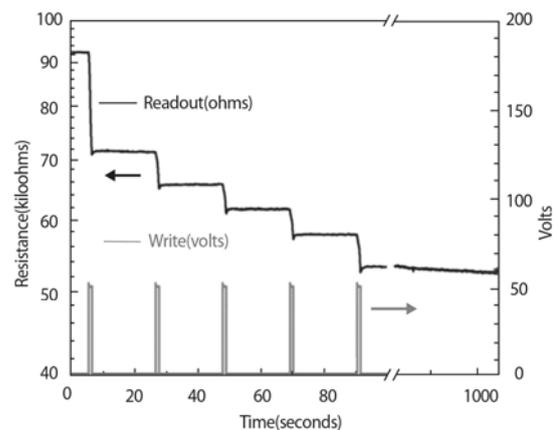
또한 (그림 6a)에서 볼 수 있듯이 MIT 현상은 전류-전압 특성에서 이력 현상(hysteresis) 현상을 보인다. 이 실험은 전이 온도 근처에 온도를 고정시켜 두고 외부 전압 펄스를 박막에 인가해주면 전기적 저항이 변화되어



(a) 전압 펄스에 의한 전류-전압 곡선



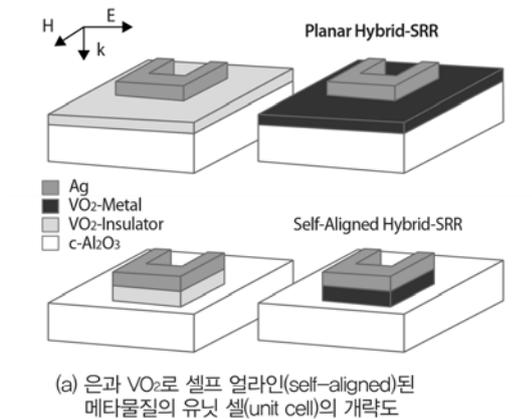
(그림 5) MIT 물질인 VO₂ Nanowire를 이용한 가스 센서[3]



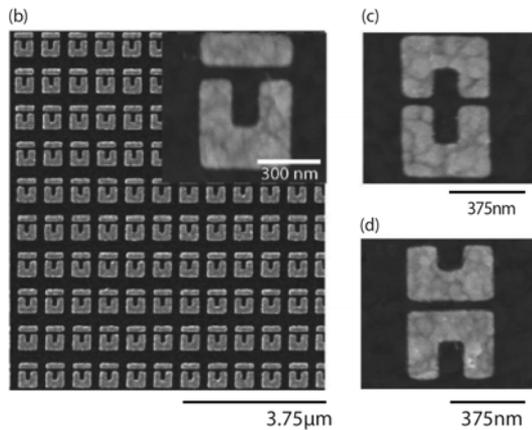
(b) 동일한 값의 외부 전압 펄스에 따라 변화되는 전기적 저항 측정 결과 (그림 6) VO₂ 소자의 이력 현상을 이용한 멤리스티브 (memristive) 연구[4]

새로운 저항상태를 읽을 수 있기 때문에 메모리스트리브 소자로서의 가능성을 보여준다. 아직까지는 이러한 메모리스트리브 특성을 보기 위해서는 전이 온도 근처에 외부 온도를 고정시켜야 하는 제한이 있지만 향후 구체적인 연구가 진행되면 상온에서도 동작될 수 있는 소자의 개발도 기대할 수 있다.

MIT 물질은 최근 활발히 연구되고 있는 metamaterial 연구에도 활용될 수 있다. (그림 7)은 MIT 물질 중 가장 대표적인 VO_2 를 이용한 metamaterial에 관한 개략도와 전자현미경 사진을 나타낸 것이다. 근적외선 영역에서의 반사도를 제어하기 위하여 기판 위에 은을



(a) 은과 VO_2 로 셀프 얼라인(self-aligned)된 메타물질의 유닛 셀(unit cell)의 개략도

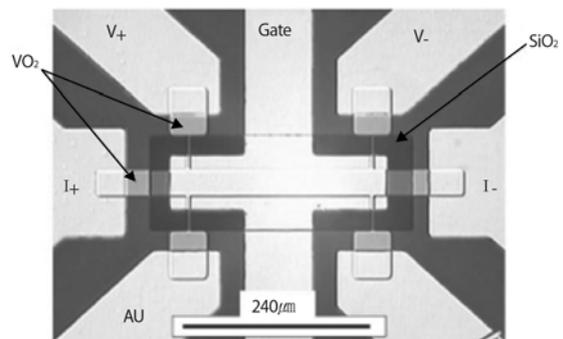


(b)~(d) 세 가지 형태로 제작된 스플릿 링 공진기(SRR) 메타물질의 주사전자현미경(SEM) 이미지

(그림 7) VO_2 를 이용하여 Near-IR의 반사도를 조절하기 위한 링 공진기 메타물질(ring-resonator metamaterial)[5]

이용하여 그림과 같은 패턴을 형성하고, 인덕턴스와 커패시턴스를 유도시켜 해당 주파수의 공진을 통한 흡수를 유도하는 구조이다. 이 은으로 만들어진 패턴 아래 MIT 물질인 VO_2 를 형성시켜 MIT 물질이 금속일 때와 유전체(절연체)일 때의 인덕턴스와 커패시턴스의 차이를 이용하여 흡수 파장을 변화시킬 수 있었다. 하나의 소자로 두 가지의 흡수 파장을 가지는 metamaterial 제작이 가능한 것이다. 이러한 현상을 발전시켜 이용하면 광학적 필터 등의 제작도 가능할 것이다. 온도에 따라, 또는 전기장에 물질의 기본적인 특성이 변화되는 MIT 물질은 기존에 존재하는 응용 분야와 다양한 형태로 결합함에 따라 새로운 형태의 소자 제작이 가능할 것으로 판단된다.

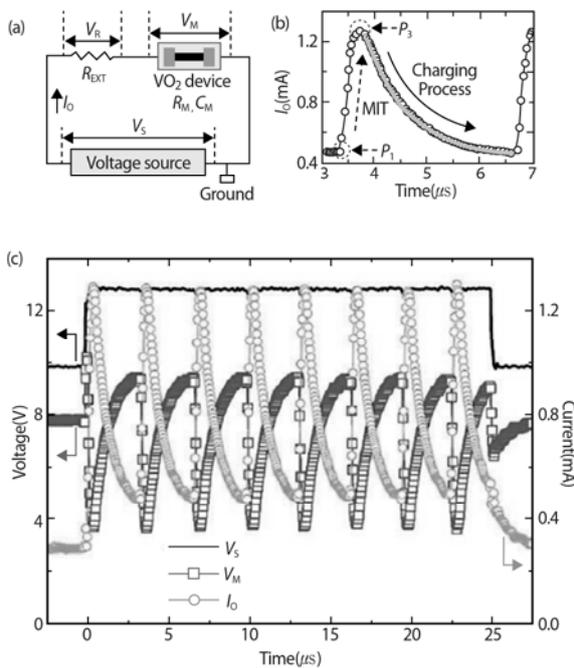
(그림 8)은 VO_2 를 이용한 3단자 소자를 나타낸 광학적 이미지이다. 기존의 전계효과 트랜지스터(Field-Effect Transistor: FET)와는 다르게 전류가 흐르는 전류채널을 VO_2 로 이용하고 게이트 전압에 따른 전기적 특성변화를 보인다. 게이트 전압과 VO_2 사이에는 기존의 절연체 물질로 보편적으로 알려진 SiO_2 층을 형성하고 소스(source)와 드레인(drain) 양단에서 전기적 저항의 측정이 가능하다. 게이트 전압을 양(+)으로 인가할 경우 전기적 저항은 초기저항에 비해 5% 정도의 저항 감소가 보이고 이와는 반대로 음(-)으로 인가할 경우 전기적 저항은 초기저항에 비해 5% 정도의 저항 증가를



(그림 8) VO_2 를 이용하여 제작된 3단자 소자의 광학적 이미지(전류가 흐르는 채널을 VO_2 박막으로 사용하고 절연층을 SiO_2 로 사용함)[6]

보인다. 즉, 게이트 전압에 따라 전기적 저항이 변화함을 보이고 있다. 실리콘을 기반으로 한 기존 FET와 비교하면 게이트 효과에 의한 전기적 변화는 작지만 금속-절연체 전이 물질을 이용한 3단자 소자(three-terminal)의 개발이라는 측면에서 시도되었다고 볼 때 의의를 가질 수 있다. 더욱이 절연층을 SiO_2 가 아닌 유전율이 높은 다른 물질로 대체하거나 임의의 캐리어 도핑을 소자에 시도한다면 보다 게이트 효과가 큰 3단자 소자의 연구가 이루어질 것이라 기대된다.

(그림 9)는 MIT 물질인 VO_2 소자에서 얻어진 발진 현상에 대한 실험 결과를 나타낸 것이다. MIT 물질은 급격한 전기적 점프로 인하여 NDR(Negative Differential Resistance) 현상이 발생하고 이러한 현상 때문에 (그림 9a)에서와 같이 구성된 회로에 직류 전압을 인가하면 교류 전압이 출력되는 현상이 발생한다. (그림 9)에서



(그림 9) (a) 발진 현상(oscillation)을 일으키기 위해 VO_2 소자와 외부저항, 직류 전압을 연결하여 구성된 회로, (b) 발진 현상 중 소자의 충전과정, (c) 구성된 회로에 일정 크기의 직류 전압을 인가하여 얻어진 소자의 전압과 회로의 전류

알 수 있듯이 단지 MIT 물질에 외부저항과 직류 전압을 인가하면 교류 전압이 출력되는 간단한 구조이다. 아직까지는 고주파 발생에 어려움이 있어 추가적 연구가 필요하지만 원리적으로 MIT는 first-order transition으로 속도가 아주 빠르기 때문에 향후 기술개발이 이루어질 경우 가장 단순한 형태의 발진기(oscillator)를 제작할 수 있을 것이다. 이러한 oscillator는 기존 Si FET를 이용한 ring-oscillator가 7 stage의 경우 14개의 트랜지스터가 필요했던 것에 비하면 오직 한 개의 MIT 소자와 한 개의 외부저항만 필요하므로 훨씬 간단하게 제작될 수 있다는 장점이 있다.

IV. 기술 파급 효과

20세기 전자공학의 꽃인 반도체 트랜지스터의 집적도를 높이는 기술이 계속 개발되어 실험실에서 채널 길이 20nm 정도까지 실현되고 상용화는 40~50nm까지 가능한 것으로 알려져 있다. 이것은 채널이 작아지면 게이트 절연체에 누설전류가 증가하게 되고, 가령 게이트가 만들어진다고 해도 반도체의 면적이 작아져서 수용할 수 있는 전류의 크기가 작아서 소자로서 사용하는 데 어려움이 있다는 것을 내포하고 있다. 이것은 반도체 소자의 한계로 알려져 왔으나, MIT의 점프 특성을 이용하면 그 한계를 극복할 수 있을 것으로 생각된다. FET의 경우 계면에서 일어나는 현상을 이용하는데 반하여 MIT의 경우 물질 자체의 성질이 절연체와 금속 사이를 움직이므로 소재 자체를 물리적 한계까지 얇게 할 필요가 없기 때문이다. 또한, 대전류 제어용 스위칭 소자의 탄생을 예고하고 있다. 현재 사용되고 있는 전기의 대부분은 교류 전기나 컴퓨터와 같은 전자제품은 직류 전원을 사용하고 있다. 직류 전기가 교류 전기보다 좋은 것은 널리 알려져 왔으나 교류를 직류로 바꾸고 직류 전압을 변환하는 데는 많은 어려움이 있고 전력 소모가 심하다.

현재 반도체 재료로 만들어진 반도체 전력용 스위칭 소자는 큰 전류를 흘리기 위해 단면적을 넓게 하여야 하고, 열의 발생으로 인하여 냉각을 시켜야 한다. 하지만 MIT 소자는 반도체보다 저항이 작은 금속 특성을 이용하므로 반도체 소자의 크기와 동일 크기를 비교할 때 수십 배 이상의 전류가 흐를 수가 있다. 이 특성을 이용하면 보다 작고 열이 발생되지 않는 대전류 제어용 스위칭 소자를 제작할 수 있다.

반도체 소자의 한계를 극복하는 나노급 전자소자는 나노급 메모리 및 스위치 시장에서 큰 경제적 기대효과를 얻을 수 있다. 대전류 제어용 스위칭 소자는 전력반도체 시장의 일부를 대체할 수 있으므로 그 분야에서 큰 경제적 기대효과를 얻을 수도 있다. MIT 물질은 전자소자적 측면에서는 신물질에 해당한다. 지금까지는 MIT의 발생 메커니즘의 이해가 부족하고 제어를 제대로 하지 못하여 전자소자 응용에 상당한 장애 요소로 작용해왔다. 최근 ETRI를 중심으로 다양한 방법으로 전이 온도와 전이 전압을 제어해 왔고, 물질적으로도 대기 중에 상당히 안정된 박막을 형성하고 있다. 이러한 노력을 바탕으로 기존의 전자소자 기술과 접목하여 새로운 큰 파급효과를 나타낼 것으로 기대된다.

V. 결론

금속-절연체 전이 물질은 특정한 온도나 전기장에서 급격한 전류의 변화를 보인다는 측면에서 아주 흥미로운 전자 재료이다. 지금까지는 전도 메커니즘의 이해 부족과 전이 현상의 제어의 어려움 등의 이유로 전자소자로 활용이 용이하지 않았다. 하지만 국내외 여러 우수 기관에서 MIT 현상에 관한 이론적 측면뿐만 아니라 여러 전자소자로의 응용에 관한 폭넓은 연구를 진행해온 결과 최근 MIT를 이용한 발진자 연구, VO₂의 이력 현상을 이용한 메모리 소자의 응용연구, 메타물질 응용,

MIT를 이용한 저발열 고전류 트랜지스터 연구 등 기존의 반도체 소자와의 하이브리드 작업을 통한 전자소자 개발을 위해 활발한 연구가 진행되고 있다. 아직 상용화 단계까지는 다소 시간이 더 걸릴 것으로 예상되지만, 최근 미국 물리학회에서 VO₂ 분과가 형성되어 있었듯이 폭발적으로 늘어난 MIT 관련 연구 발표 등으로 미루어 볼 때 우리의 실제 생활에 MIT를 이용한 전자소자가 폭넓게 쓰일 시간이 그리 멀지 않았음을 미루어 짐작할 수 있다.

용어해설

MIT 금속-절연체 전이현상(Metal-Insulator Transition)의 약자이고, 특정한 온도나 전기장, 빛, 압력과 같은 외부에서 가해지는 에너지에 의해서 MIT 물질이 절연체 상태에서 갑자기 금속 상태로 변하는 현상

NDR(Negative Differential Resistance: 음성미분저항) 소자에 흐르는 전류가 증가할 때, 전압이 감소하는 현상을 나타냄. 주로 발진기(oscillator)의 요소로 사용됨.

약어 정리

FET	Field-Effect Transistor
MIT	Metal-Insulator Transition
NDR	Negative Differential Resistance
PCM	Phase Change Memory
SPT	Structural Phase Transition
SRR	Split-Ring Resonator

참고문헌

- [1] M.M. Qazilbash et al., "Mott Transition in VO₂ Revealed by Infrared Spectroscopy and Nano-Imaging," *Sci.*, vol. 318, 2007, pp. 1750-1753.
- [2] H.T. Kim et al., "Mechanism and Observation of Mott Transition in VO₂-based Two- and Three-terminal Devices," *New J. Phy.*, vol. 6, no. 52, 2004.
- [3] J.M. Baik et al., "Pd-Sensitized Single Vanadium Oxide Nanowires: Highly Responsive Hydrogen Sensing Based on the Metal-Insulator," *Nano Lett.*, vol. 9, no. 12, 2009, pp. 3980-3984.
- [4] T. Driscoll et al., "Phase-transition Driven Memristive System," *Appl. Phy. Lett.*, vol. 95, 2009, pp.

043503-1-043503-3.

- [5] M.J. Dicken et al., "Frequency Tunable Near-infrared Metamaterials Based on VO₂ Phase Transition," *Opt. Express*, vol. 17, no. 20, 2009, pp. 18330-18339.
- [6] D. Ruzmetov et al., "Three-terminal Field Effect Devices Utilizing Thin Film Vanadium Oxide as the Channel Layer," *J. Appl. Phys.*, vol. 107, no. 11, 2010, pp. 114516-1-114516-8.