

신개념 스위칭 소자를 위한 모트-절연체 금속 전이 기술

Mott-Insulator Metal Switching Technology for New Concept Devices

김현탁 (H.T. Kim, htkim@etri.re.kr)
노태문 (T.M. Roh, tmroh@etri.re.kr)

반도체소부장기술센터 연구전문위원
반도체소부장기술센터 책임연구원/센터장

ABSTRACT

For developing a switching device of a new concept that cannot be implemented with a semiconductor device, we introduce the Mott insulator-metal transition (IMT) phenomenon occurring out of the semiconductor regime, such as the temperature-driven IMT, the electric-field or voltage-driven IMT, the negative differential resistance (NDR)-IMT switching generated at constant current, and the NDR-based IMT-oscillation. Moreover, the possibilities of new concept IMT switching devices are briefly explained.

KEYWORDS New concept device, Mott MIT, NDR, Neuromorphic

1. 서론

물질에는 전기가 잘 통하는 금속(혹은 도체)과 전기가 잘 통하지 않는 절연체(혹은 부도체)와 금속보다는 훨씬 작은 전류가 흐르면서 저온에서는 절연체인 반도체가 있다. 금속은 최외각에 홀수개의 전자가 있지만 절연체와 반도체는 최외각에 짝수개의 전자로 구성되어 있다. 이것이 에너지 밴드 이론에 기반을 둔 금속과 절연체와 반도체의 정의이다[1,2]. 절연체와 반도체는 에너지 밴드 갭이라는 것이 있으며, 반도체의 에너지 갭은 절연체의

갭보다 작다. 반도체 갭이 절연체 갭보다 작은 이유에 대해서 학문적으로 설명이 되었다[3].

그런데 이와 같은 에너지 밴드 이론을 따르지 않는 물질이 1930년대부터 계속 발견되어 왔다. 이런 물질들은 최외각에 홀수개의 전자를 갖는 금속의 전자구조를 가지면서 전기적으로 절연체의 성질을 띠는 것으로 모트(Mott) 절연체로 정의되었다[1,2]. 모트 절연체도 절연체의 전자구조를 갖기 때문에 전자와 원자핵 사이에 작용하는 에너지가 핵 근처의 가까운 거리까지만 미친다는 가정 아래 에너지 갭은 $E_{gap}=U(1-2zt/U)$ 으로 계산

* DOI: <https://doi.org/10.22648/ETRI.2021.J.360304>

* 이 기술동향 보고서는 2021년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 것임[과제번호: 2017-0-00830].



사실 공간 (Real space)

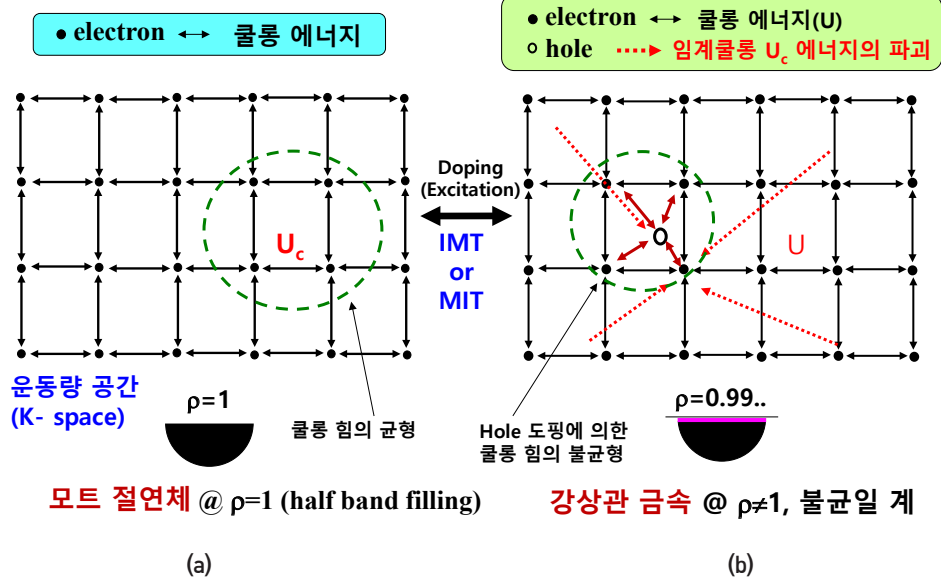


그림 1 (a) 모트 절연체를 나타낸 것으로 사실공간(Real space)에서 금속의 전자구조(One electron per atom)와 운동량 공간(K-space)에서 s 궤도에 한 개의 전자가 존재(Half band filling)한다는 것을 묘사한다. 여기서 금속의 전자구조는 각 격자점에 한 개의 전자 한 개의 원자가 있다고 정의한다. 양방향 화살표는 두 전자 사이에 임계 쿨롱 반발 에너지, U_c 를 의미한다. 모트 절연체는 각 전자들 사이에 U_c 에 의해 균형을 이루고 있다. (b) 모트 절연체에 정공이 도핑되었을 때, 전자들 사이에 임계 쿨롱에너지의 균형이 무너져서($U_c \rightarrow U$) 모트 절연체에서 강상관(쿨롱) 금속으로 전이(IMT)가 일어나는 모습을 나타낸다.

되었다. 여기서 U 는 금속의 자유 전자들 사이에 작용하는 전자-전자 쿨롱(Coulomb) 반발 에너지이다. 또한 $2zt/U \ll 1$ 이 만족될 때, 쿨롱에너지를 임계 쿨롱에너지 U_c 라고 하며, 에너지 갭은 $E_{gap} \approx U_c$ 의 함수로 표현된다. 따라서 모트 절연체는 자유전자들 사이에 매우 큰 쿨롱에너지 U_c 가 있을 때 에너지 갭이 형성되는 것으로, 일반적으로 에너지 밴드 이론에서 정의되는 전자-원자핵(전자-포논) 상호작용에 의해 형성되는 에너지 갭을 갖는 절연체(파이어스(Peierls) 절연체라고 부름)와 다르다. 다시 말하면, 자유전자들 사이에 U_c 가 존재하면 어떤 자유전자가 옆으로 혹은 위 혹은 아래로 어디로든지 움직이려고 할 때, 바로 근처에 있는 전자가 그 전자를 밀어내기 때문에, 그 전자 는 쿨롱 힘의 균형으로 움직이지 못한다. 결국에

는 그 물질은 부도체, 즉 모트 절연체가 된다(그림 1(a)).

모트-절연체 금속 전이 스위칭은 모트 절연체에서 임계 쿨롱에너지의 크기를, 즉 $U_c \rightarrow U < U_c$ 으로 줄이면 쿨롱에너지의 균형이 갑자기 무너져서 모트-절연체에서 강상관(혹은 쿨롱에너지) 금속으로 전이가 일어난다(임계 쿨롱에너지의 파괴: Breakdown of the critical Coulomb interaction)(그림 1(b)). 이 현상을 절연체-금속 전이(IMT) 혹은 공학적으로 모트-절연체 금속 스위칭이라고 한다. 이 IMT 혹은 스위칭은 물질의 구조를 형성하는 원자 간 상호작용이 아니기 때문에 물질의 구조 상전이와 관계없이 일어난다. 그 스위칭을 위한 쿨롱에너지의 파괴는 온도를 가하거나 빛을 가하거나 높은 압력을 걸어주거나 큰 전기장을 걸어주거나 화

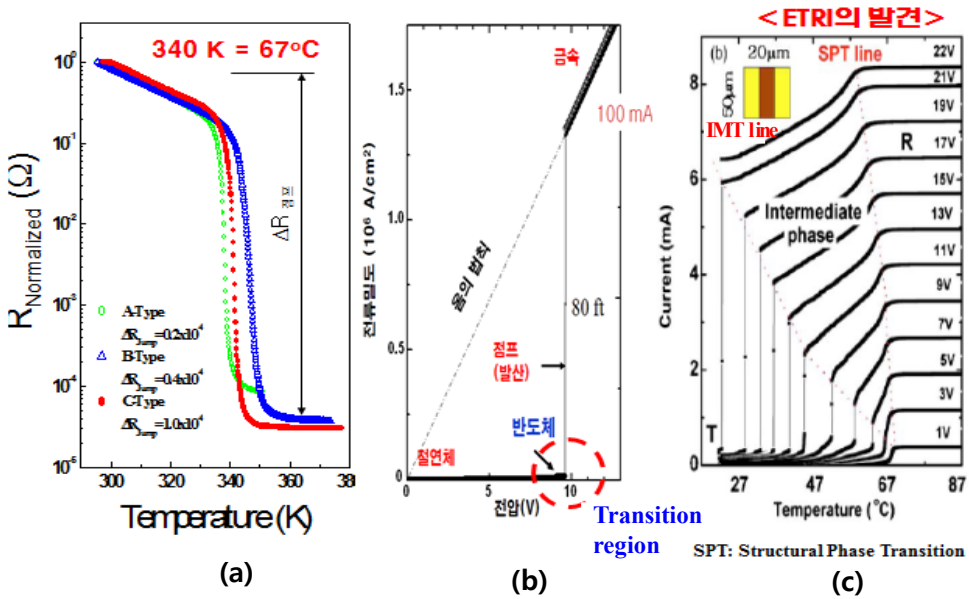


그림 2 (a) IMT 물질 VO₂를 이용하여 2개의 전극을 갖는 다이오드 구조(2단자)의 IMT 소자에서 측정된 저항의 온도의존성으로 $T_c \gg 67^\circ \text{C}$ 근방에서 큰 저항의 변화를 보여준다. 이 온도를 IMT(Insulator–Metal Transition, 절연체–금속 전이) 임계온도라고 한다. (b) 전류–전압 측정에서 관측된 전기적 점프를 보여준다. 반도체는 절연체와 금속의 중간에 존재함을 보여준다. 이것은 IMT가 반도체를 경유해서 일어난다는 것을 의미한다. (c) IMT 소자에 온도와 전압을 가하였을 때, 전류의 온도와 전압의존성을 보여주며, 전기적 점프는 전압에 의해 제어될 수 있음을 보여준다. 그림에서는 IMT 라인과 SPT(Structural Phase Transition: 구조 상전이) 라인이 떨어져 있는 것을 보여준다. SPT는 원자구조의 변화이고, IMT는 전자구조의 변화이다. 이것은 IMT가 SPT에 의존하지 않는다는 것을 뜻하며, 이 물질에서 임계온도 근처에서 IMT와 SPT가 동시에 일어난다는 기존에 주장되어온 피어얼스(Peierls) IMT가 아니라 IMT는 SPT와 관계없다는 모트 MIT의 증거로 제시된다[6].

학적 도핑을 하는 등과 같이 외부에서 에너지를 가할 때 일어난다(그림 1(b))[4,5]. 그 스위칭은 인위적으로 조정될 수 있다. 이 모트 IMT 현상은 50년 이상의 오랜 물리문제로서 ETRI의 MIT 연구팀에 의해 최초로 실험적으로 밝혀졌다[4,5].

이 IMT 현상은 많은 재료에서 일어나며 대표적으로 안정적인 물질 이산화바나듐 VO₂에서도 일어난다. 또한 인위적으로 Si 소자에서도 이 현상을 일으킬 수 있다. 이 IMT를 이용하면 고감도 센서, 전력용 스위칭 소자, 뉴로모픽 소자, 양자 소자인 큐비트 등의 신개념 소자를 만들 수 있다.

이 동향분석에서는 모트 IMT 스위칭 현상과 그것을 이용하는 신개념 스위칭 소자 기술들을 간략

히 소개한다.

II. 본론

1. 온도에 의한 모트 IMT 스위칭

대표적인 모트 절연체 VO₂(3d^t, Half Filling, 금속의 전자구조)는 상온 이하에서 절연체이고, 상온과 임계온도 $T_c \gg 67^\circ \text{C}$ 사이에서 반도체이고, T_c 위에서 금속이다. 임계온도에서 반도체–금속 전이는 급격하게 일어난다(그림 2(a)). 온도 이외에 IMT 소자에 전압을 가해도 전기적 점프(IMT 현상)가 일어나고, 그 점프 이후에 금속의 증거인 음의 현상이 관측된다(그림 2(b)). 또 IMT 소자에 전압과

온도를 동시에 가하면, IMT의 임계온도 T_c 는 전압의 증가에 따라 감소한다(그림 2(c)). 그 임계온도는 온도와 전압을 동시에 가하면서 제어될 수 있다(그림 2(c)). 추가로 이러한 IMT 소자는 발열하는 전자부품에 적용되어 과열방지 소자로 사용될 수도 있다. 또한 상온에서 전압만을 이용하여 IMT 임계 전압을 발열하는 파워 소자를 제어하는 곳에 사용될 수도 있다.

2. 부성미분저항 현상

2개의 전극을 갖는 2단자 구조의 IMT 소자(그림 2(c)의 삽입 그림)에 직류 전압을 가하면 그림 2(b)와 같이 임의의 IMT 전압에서 순간적으로 큰 전류가 흐르는 전기적 점프가 일어난다; 일정한 전압에서 IMT가 일어난다고 해서 정전압 모드라고 한다. 정전류 모드도 있다(그림 3). 그런데 이 경우 임계 IMT 전압에서 큰 전류가 흐른다는 장점이 있지만, 그 큰 전류로 인하여 발열과 히스테리시스 현상이 일어나서 반복적인 스위칭이 되지 못한다(그림 4(b) 검은색 선과 초록색 선과 히스테리시스). 히스테리시스를 제거하여 IMT에 의해 발생하는 큰 전류 스위칭을 일으키기 위하여, 대안으로 측정할 때 일정한 전류를 가하면서 전압을 측정하면, 그 일정한 전류 때문에 과도한 전류가 흐르지 않고 반도체 한계보다 큰 전류를 흘리면서 스위칭을 할 수 있다. 이 현상을 간략히 살펴보면, 옴의 법칙 $V=IR$ 에서 일정한 전류 I 의 펄스를 가할 때, IMT 현상에 의해서 저항 R 이 불연속적으로 크게 줄어들면서 측정되는 전압도 갑자기 감소한다. 이 현상은 일정한 전류(그림 3(b)에서 초록색 펄스)에 대해 저항 변화에 대한 전압 변화(그림 3(b)에서 노란색 피크)이므로 NDR(Negative Differential Resistance; 부성미분저항, $dV/dR < 0$) 현상이라고 한다. 이 현상

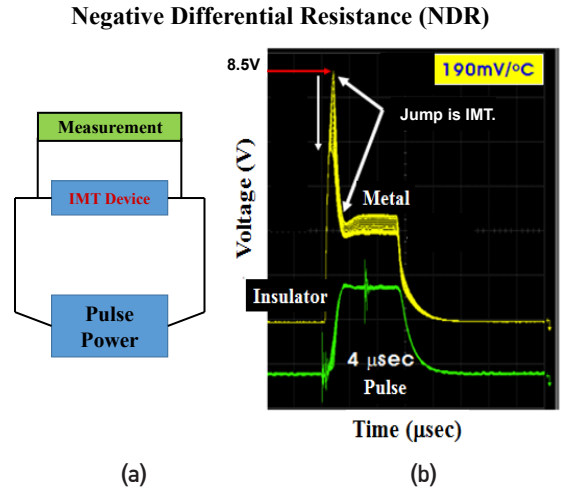


그림 3 (a) MIT 소자에 직류 펄스 파워와 측정 계측기를 병렬로 연결한 NDR(부성미분저항) 피크 측정방법 (b) MIT 소자에 4msec의 펄스 정전류를 공급하면서 동시에 측정된 전압곡선. 정전류 펄스가 상승할 때 IMT가 일어나서 저항이 갑자기 줄어들어 펄스의 정전류 기간 동안 저항의 감소로 인해 전압 감소(Peak 형성)가 관측된 것이다. 이 피크 모양을 NDR IMT 곡선이라고 한다.

은 과도한 전류가 흐르지 않기 때문에 열이 심하게 나지 않아서 반복적인 IMT 스위칭이 가능하다. 그 흐르는 전류는 반도체 영역의 한계 전류보다 크고 금속상태에서 흐르는 전류보다 작다(IMT 영역). 이 스위칭은 IMT를 이용하는 것으로 전압 피크 현상으로 나타나는 신개념이고(그림 3), 이것을 이용하면 신뢰성이 있는 신개념 소자를 만들 수 있다.

3. IMT 진동

모트-IMT NDR 스위칭의 대표적인 예는 그림 4(d)에서 보여주는 것처럼 IMT 진동(Oscillation)이다. 이 진동은 반도체 소자 특성 측정 계측기(Parameter Analyzer 4156B)로 그림 4(a)에 있는 IMT 물질 VO₂ 기반 IMT 소자의 I-V 측정에서 얻어졌다. 그림 4(b)에서 전류를 증가시키면서 측정하는 것은 빨간색 선이고, 전류를 감소시키면서 측정하는 것

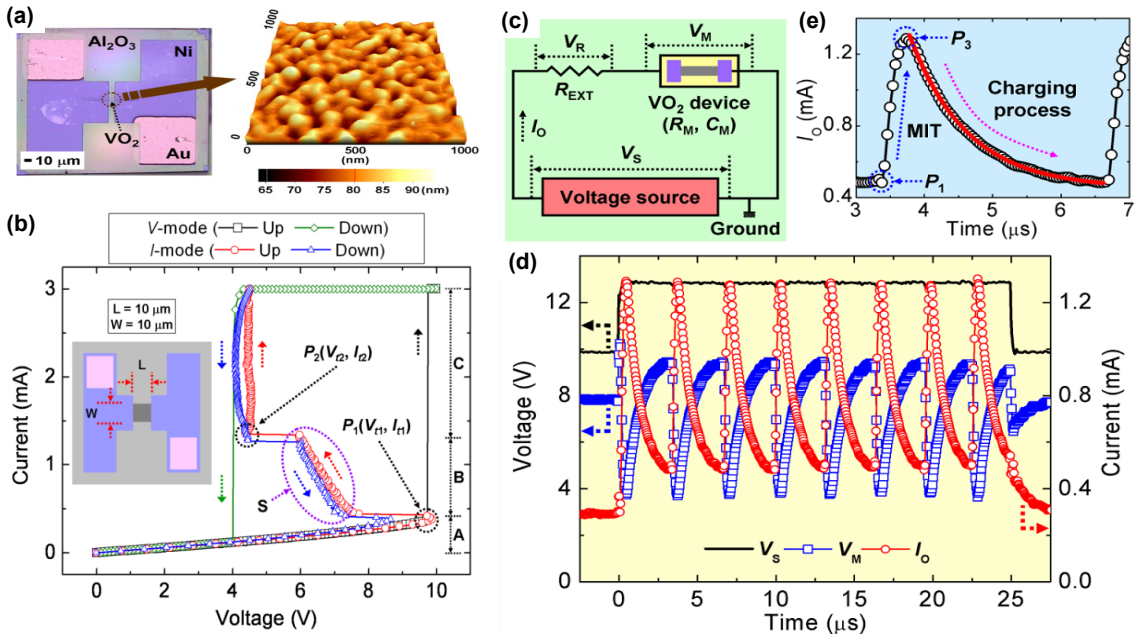


그림 4 (a) IMT(혹은 MIT) 물질 VO₂ 기반 2단자 IMT 소자를 보여준다. (b) IMT 소자에 그림 3(a)에 따라 측정된 I-V 곡선의 전류 모드(I-Mode)와 전압 모드(V-Mode)를 보여준다. (c) IMT 진동 측정용 회로도이다. 전압 소스(Voltage source)는 직류 전원이다. (d) 측정된 IMT 진동이다. (e) IMT 진동에서 전류가 감소하는 곡선은 전하가 캐패시터에 충전되는 것을 의미한다[7].

은 파란색 선이다. 이것은 매번 측정할 때 일정하게 전류를 가하면서 전압을 측정하였다(전류모드, I-Mode)(그림 3의 NDR 측정 방법). 이 I-Mode 측정은 열이 훨씬 작게 나서 히스테리시스 현상이 관측되지 않는다. 그래서 이 측정은 반복성이 있다는 것을 의미한다. 이 그림은 P1 지점에서 전압이 급격히 감소하는 점프와 S 곡선을 경유하면서 P2의 전압 점프를 보여준다. 여기서 P1과 P2의 전압 점프는 그림 3에서 설명된 NDR의 전압점프이다. 여기서 특이한 현상은 S 곡선의 기울기($dl/dV < 0$)가 음이라는 것이다. 이것은 반도체의 특성인데, 이것은 이 물질 속에 금속 성분과 반도체 성분이 공존하고 있다는 것을 뜻한다.

그림 4(c)는 IMT 진동을 측정하기 위하여 구성된 회로도이다. IMT 소자는 외부저항, R_{ext} 와 직류 전원, V_s 와 직렬연결된다. 이 IMT 진동의 기본

원리는 IMT 소자의 내부저항과 외부저항 사이에서 IMT 현상에 의해 발생한 저항변화가 일어나서 IMT 후 금속성분이 형성되고, 이때 그림 4(b)에 있는 반도체 특성 S에서 제시된 IMT가 일어나지 못

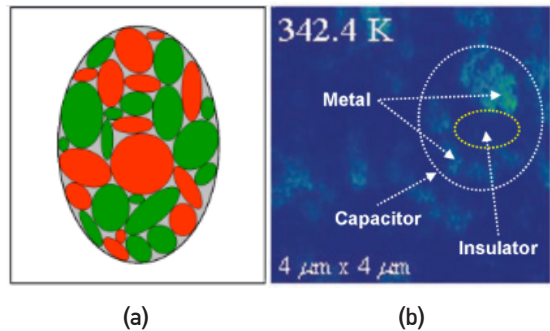


그림 5 (a) IMT가 일어날 때 금속상(붉은색)과 반도체상(초록색)이 공존하는 불균일 모델이다. (b) IMT 물질 VO₂에서 근접장 현미경으로 사실공간에서 IMT 과정에서 측정된 불균일상의 이미지이다. 캐패시터가 되는 메커니즘을 보여준다[8].

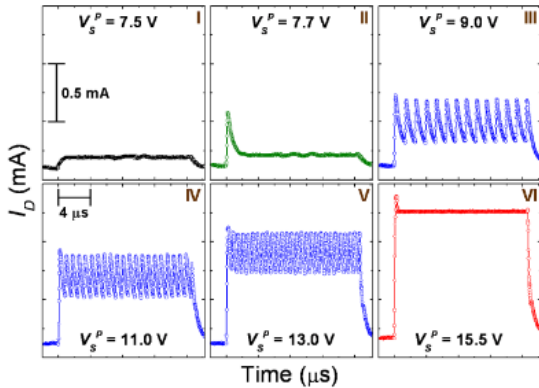


그림 6 그림 4(a)에 있는 IMT 소자와 그림 4(c) 회로로 구성된 IMT 진동 측정 시스템에서 측정된 IMT 진동의 직류 전원 전압 의존성을 보여준다. 전원 전압의 증가에 따라 NDR 곡선이 나타나고(그림 II), 계속된 전원 전압의 증가에 따라 전류가 증가하면서 IMT 진동 주파수도 증가하고(그림 III, IV, V), 결국에는 진동주파수가 사라진다(그림 VI)[8].

하고 남아 있는 반도체 성분이 존재하여, 그 반도체 성분은 IMT에 의해 형성된 금속성분이 전극이 되어서 캐패시터가 형성되는 것이다(그림 5)[7,8]. 그래서 외부 저항, R_{ext} 와 캐패시턴스, C와 함께 RC 회로가 형성되어서 RC 진동 현상이 나타난다. 그리고 IMT 진동에서 전류가 줄어드는 현상은 전하가 충전되는 현상이다(그림 4(e)). 이것이 IMT 진동이다(그림 4(d)). IMT 진동은 그림 4(b)에 있는 P1과 P2 사이에서 일어난다[7,8]. 그림 5는 IMT 과정에서 금속과 반도체 상이 공존하는 불균일성과 캐패시턴스가 형성되는 메커니즘을 보여준다[8].

그림 6은 IMT 진동의 DC 전원 전압 의존성을 보여준다. DC 전원 전압, V_s 이 증가함에 따라 갑자기 IMT 진동이 나타나고(그림 6, II) 그 진동의 주파수는 전압의 증가에 따라 증가하다가 어느 한계 전압에서 갑자기 진동이 사라진다(그림 6, VI). 이것은 전압의 증가에 따라 IMT 소자에서 IMT 전류가 증가하면서 내부 발열이 증가하여 소자 내의 반도체 특성 S가 감소하면서 캐패시터의 캐패시턴스

의 크기가 줄어서 $t=RC$ 가 감소하여 상대적으로 주파수 $f(\propto 1/t)$ 가 증가하기 때문이다[7,8]. 그래서 소자 내부의 온도가 IMT 임계온도에 도달하여 C 성분이 사라지면서 진동도 함께 사라진다[7,8].

III. 결론

반도체 영역 밖의 IMT 영역에서 NDR IMT 스위칭을 이용하면 동일 조건에서 반도체 소자보다 큰 전류가 스위칭되므로 전력용 스위칭 소자가 가능하고, IMT가 일어나는 임계 조건을 뉴런의 역할로 이용하면 뉴로모픽 소자로 활용이 가능하며, IMT가 발생할 때 금속상과 반도체상이 공존하는 불균일상을 이용하면 양자컴퓨터의 큐비트를 만들 수도 있다. 따라서 모트 IMT 스위칭을 이용하는 미래 신개념 스위칭 소자의 가능성을 밝혀준다. 추가로 앞서 보여준 IMT 스위칭은 Si 소자에서도 구현이 가능하다[9].

용어해설

모트-절연체 최외각에 홀수개의 전자를 갖는 금속의 전자구조를 가지면서 전기적으로 절연체의 성질을 띠는 절연체(혹은 반도체)(그림 1)

모트 IMT 스위칭 모트 절연체에서 금속으로 전이가 일어나는 스위칭(그림 1)

모트 MIT 금속에서 모트 절연체로 전이

약어 정리

모트(Mott)	물리학자, Nevill Francis Mott의 성(last name)
파이얼스(Peierls)	물리학자, Rudolf Ernst Peierls의 성
IMT	Insulator-Metal Transition
MIT	Metal-Insulator Transition

NDR Negative Differential Resistance

참고 문헌

- [1] N.F. Mott, "Metal-Insulator Transitions," 2nd, CRC Press, London, UK, 1990, pp. 1-2.
- [2] H.T. Kim, "What is Mott transition and explain in detail?," Quora(Internet question cite).
- [3] H.T. Kim, "Why-is-energy-gap-of-semiconductor-smaller-than-that-of-insulator?," Quora(Internet question cite).
- [4] H.T. Kim et al., "Mechanism and observation of Mott transition in VO₂-based two-and three-terminal devices," New J. Phys., vol. 6, no. 52, 2004.
- [5] H.T. Kim et al., "Monoclinic and correlated metal phase in VO₂ as evidence of the Mott transition: coherent phonon analysis," Phys. Rev. Lett., vol. 97, no. 26, 2006, 266401.
- [6] B.J. Kim et al., "Temperature dependence of the first-order metal-insulator transition in and programmable critical temperature sensor," Appl. Phys. Lett., vol. 90, no. 2, 2007, 023515.
- [7] Y.W. Lee et al., "Metal-insulator transition-induced electrical oscillation in vanadium dioxide thin film," Appl. Phys. Lett., vol. 92, no. 16, 162903.
- [8] H.T. Kim et al., "Electrical oscillations induced by the metal-insulator transition in VO₂," J. Appl. Phys., vol. 107, no. 2, 2010, 023702.
- [9] H.T. Kim, "Negative-differential-resistance-switching Si-transistor operated by power pulse and identity of Zener breakdown," Appl. Phys. Lett., vol. 103, 2013, 173501.