

3 위상절연체 연구 동향

글 최지현 석박사통합과정 | 한양대학교 재료화학공학과
박태주 교수 | 한양대학교 재료화학공학과

1. 서론

일반적으로 물질은 그 물질이 갖는 다양한 성질에 기반하여 분류되며, 전자기적 특성, 광학적 특성, 열역학적 특성 및 기계적 특성과 같은 성질이 이에 속한다. 이러한 각기 다른 특성의 발현에 있어서 공통적으로 전자의 존재양상 및 거동이 그 기반이 된다. 따라서 물질 고유의 특성을 규명하기 위해서는 전자의 존재양상 및 거동이 중요하게 고려되어야 한다. 이때 해당 물질이 갖는 고유한 밴드 구조(electronic band structure)는 이에 밀접한 관련이 있다는 점에서 주목할 만하다.

결정성 고체는 전자의 거동 관점에서 금속, 반도체, 절연체 등으로 분류할 수 있다. 금속의 경우, 페르미 준위(Fermi level)에 위치한 유한한 상태 밀도(density of state)로 인해 전자들이 자유롭게 움직이는 반면, 절연체의 경우, 허용된 상태밀도가 존재하지 않는 밴드갭 내에 페

르미 준위가 놓이게 되고, 이로 인해 전자의 거동이 제한되어, 절연체로서의 특성을 갖는다.

최근 두 물질의 특성을 모두 지니는 세 번째 유형의 물질이 발견되었다. 벌크에 에너지 밴드갭이 위치하여 절연체의 성질을 갖지만, 표면에는 전자의 연속적인 에너지 준위가 존재하여 gapless한 금속의 성질을 갖는 위상절연체(topological insulators)가 바로 그것이다 [1]. 일반적인 절연체와 비교하였을 때의 특징적인 차이점은 금속성 표면을 지니고 유지한다는 점이다. 이는 위상절연체를 정의하는 데에 있어 가장 중요한 요소이기도 하다.

한편, 위상절연체의 도입과 함께 이를 적용할 수 있는 분야에 대한 관심이 증가하고 있다. 기존 Si 기반 소자를 대체하는 차세대 고성능 전계효과 트랜지스터의 구현을 위한 금속성 표면 준위에 기반한 채널 연구, 금속성 표면을 따라 존재하는 각각의 momentum이 갖는 스핀에 기반한 스핀 전류(spin current) 연구,

더 나아가 스핀 전류를 활용하는 메모리 그리고 양자적 컴퓨팅 연구 등이 이에 속할 수 있다.

본고에서는 위상절연체의 고유한 특성에 대한 물리학적 기본 원리와 이를 구현할 수 있는 재료 및 그 특성을 소개하고, 현재까지의 관련된 연구동향 및 향후 전망을 살펴보고자 한다.

2. 위상절연체의 기본 원리

위상절연체란 양자 물질의 새로운 유형으로서, 절연체인 벌크와 금속성 표면의 두 가지 특성을 모두 지니는 물질이다. 여기서 금속성 표면에 존재하는 에너지 준위는 시간 역전 대칭성(time-reversal symmetry)에 의해 위상학적으로 보호된다. 위상절연체가 갖는 이러한 특징에 의해 에너지 준위가 유지될 수 있으며, 표면의 금속성이 강하게 지속 될 수 있다. 최근 시간 역전 대칭의 개념이 물리학 내에서 큰 관심을 끌고 있다. 시간 역전 대칭 현상은 어느 물질에서나 나타나지는 않으며, 오로지 시간 역전 불변량(time-reversal-invariant)을 지니는 물질에서만 발견되는 현상이다. 위상절연체는 해당 물질이 절연체의 성질을 띠는 한 변할 수 없는 시간 역전 불변량 즉, 위상학적 불변량을 지닌다는 점으로부터 금속성 경계면이 보존된다 [2,3]. 한편, 수학적 개념에서의 위상이란, 늘리거나 구부리거나 구기는 등의 지속적인 변형이 존재할 때에도 변하지 않는 특성을 의미한다. 대표적인 예시로 도넛과 커피잔이 해

당된다. 두 물질은 서로 왔다 갔다 하면서 지속적인 변형이 가능하며, 그럼에도 하나의 구멍이라는 변하지 않는 성질을 유지한다. 따라서 도넛과 커피잔은 위상학적으로 같은 물질이라고 정의할 수 있다 [4].

표면에 금속성을 지닌다는 점은 실제 위상절연체의 주요한 실험적 특징이다. 과거의 연구는 위상절연체의 존재를 이론적으로 예측하는데에 주력했다. 초기에 보고된 것은 3차원의 위상절연체가 아닌 2차원에서의 위상 구조의 존재였다. 양자 홀 효과(quantum hall effect)는 2차원 시스템 속에서 전자가 존재하는 면에 수직으로 작용하는 강한 외부 자기장이 존재할 때, 내부 전자의 움직임은 원을 그리며 움직임이 제한되는 반면, 면 가장자리의 경우 전자가 한쪽 방향으로 연속적인 움직임을 갖게 된다(그림 1). 다시 말해, 전도성을 지니는 가장자리의 존재를 설명했으며, 이를 양자 홀 가장자리(quantum hall edges)라고 정의했다 [5]. 더 나아가, 양자 홀 효과의 확장 개념으로 등장한 것이 바로 양자 스핀 홀 효과(quantum spin hall effect)이다. 이에 대한 개념은 기존 2차원 시스템

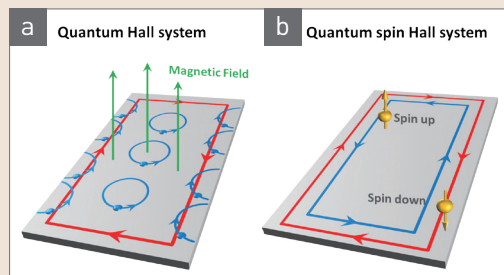


그림 1 ▶ (a) The movement of electrons with quantum hall effect and (b) quantum spin hall effect in 2D system [19].

속에서 강한 외부 자기장의 조건 없이도 전도성을 띄는 가장자리를 구현할 수 있는지에 대한 가능성으로부터 시작되었다. 양자 스핀 홀 효과는 강한 외부 자기장에 의한 움직임 대신에, 결정격자를 지나는 전자 자체의 움직임에 의해 유도되는 힘으로 양자 홀 상태를 형성하는 것을 설명한다. 스핀-궤도 상호작용(spin-orbit coupling)은 이러한 전자 자체의 움직임으로 인해 유도되는 힘을 뒷받침하는 중요한 개념이다. 스핀-궤도 상호작용이란, 전자가 갖는 고유 스핀과 오비탈의 각 모멘텀(angular momentum)의 자유도(degree of freedom)가 커플링 되는 것을 의미한다. 결과적으로 커플링은 외부 자기장에 의한 힘 없이도 결정 구조 내에서 거동하는 전자 자체가 만들어내는 스핀에 의해 유도된 힘을 가지게 한다. 이렇게 유도된 힘은 전자가 가장자리를 통해 움직이는 것을 설명할 뿐 아니라, 해당 전자가 갖는 반대 방향의 스핀 업/다운으로 인해 한쪽 방향으로 제한되지 않고 양방향으로 움직일 수 있음을 설명한다(그림 1) [6,7].

결론적으로 양자 홀 효과와 양자 스핀 홀 효과는 모두 가장자리에선 금속성을 띄지만 내부는 절연성을 띄는 2차원의 위상 구조의 원리를 설명하고 있다. 한편, 밴드 구조적 관점에서 바라보았을 경우, 표면에 금속성을 지닌다는 것은 표면에 에너지 준위가 존재하며, 그 에너지 준위가 절연체인 벌크가 지니는 밴드 갭 사이에 위치한다고 해석할 수 있다(그림 2).

지금까지는 단순히 2차원에서 위상절연체의 성질이 나타남을 밝혔다. 다시 말해, 2차원

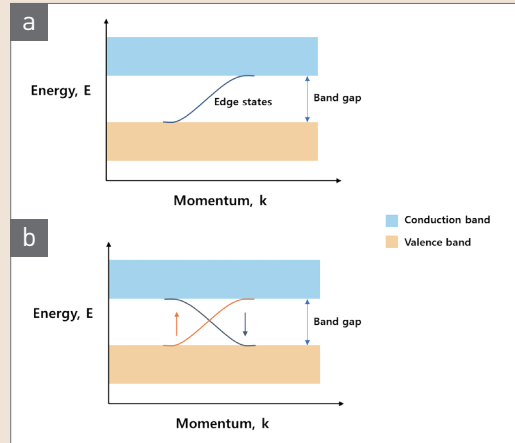


그림 2 ▶ (a) The energy-momentum graph for quantum hall effect and (b) quantum spin hall effect.

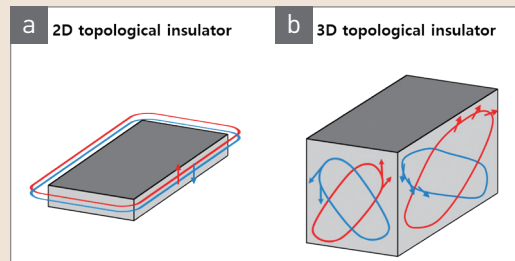


그림 3 ▶ Diagrams of spin direction (a) at the edge in 2D and (b) at the surface in 3D [20].

구조는 사실상 위상절연체가 아니고, 위상절연체가 갖는 독특한 특성이 발현되는지에 대한 이론적 기반을 위한 도구에 불과하다. 이렇게 2차원에서 발현된 성질을 토대로 3차원 위상절연체에 대한 연구가 시작되었다. 일반적으로 위상절연체는 크게 약 위상절연체(weak topological insulator)와 강 위상절연체(strong topological insulator)로 나뉜다. 약 위상절연체는 단순히 양자 홀 효과가 나타난 2차원 구조를 층층이 쌓아서 형성할 수 있다 [8]. 반면, 강 위상절연체의 경우, 단순히 쌓아 올리는 구조보다 더 미세하게 2차원과의 관계를 형성하

고, 이는 결과적으로 더 복잡한 스핀-궤도 상호작용이 연관되어 있다. 즉, 기존의 스핀 업과 다운으로부터 벗어나 스핀의 모든 요소들이 섞여서 표면의 에너지 준위를 결정한다(그림 3). 표면에 놓인 disorder 혹은 불순물이 에너지 준위를 산란시킬 수는 있지만, 해당 에너지 준위가 표면으로부터 완전히 사라지지 않게 유지함으로써 위상절연체가 갖는 금속성 표면을 유지하게 한다 [9].

3차원 위상절연체의 밴드 구조는 그 형상이 그래핀(graphene)의 경우와 유사하다는 특징이 있다. 그래핀은 탄소 원자들로 연결된 하나의 층으로 이루어져 있으며, 하나의 탄소 원자가 이웃한 3개의 탄소 원자와 sp^2 결합을 하고 있다. 따라서 4개의 공유 결합이 가능한 탄소는 잉여 전자가 생기고, 이로 인해 그래핀은 항상 전도성을 띄게 되며 이 때의 전자 파동 함수는 일반적인 슈뢰딩거 이차식(Schrödinger equation)을 따르지 않고, 디랙 일차식(Dirac equation)을 따른다. 디랙 함수를 따르는 밴드 구조는 에너지-모멘텀 선형 그래프로서, 가전자대와 전도대가 하나의 점에서 만나며 밴드 갭이 존재하지 않게 된다. 이때 가전자대와 전도대가 만나는 점을 dirac point라고 정의하고, 해당 밴드 구조를 dirac cone structure라고 일컫는다(그림 4) [10]. 마찬가지로 위상절연체의 밴드 구조 또한 dirac cone structure이며 dirac point가 존재한다. 해당 밴드 구조는 실제로 angle-resolved photoemission spectroscopy (ARPES)와 scanning tunneling spectroscopy (STS)로 관찰되었으며, 벌크 절연체 내 존재하

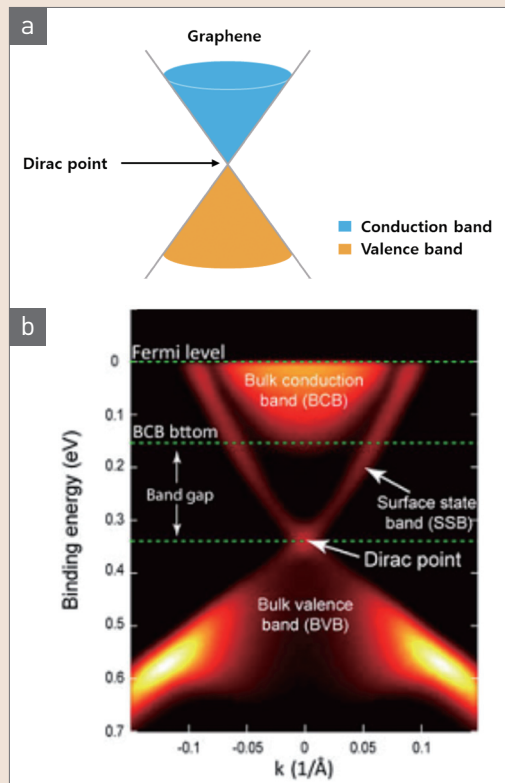


그림 4 ▶ (a) Dirac-cone band structure diagram of graphene and (b) the energy-momentum band structure measured by ARPES for Bi_2Se_3 [21].

는 밴드 갭 사이에 금속성 표면의 에너지 준위가 선형구조 dirac-cone 모양으로 dirac point와 함께 존재함을 확인하였다(그림 4).

3. 위상절연체 특성 발현 소재

최근 Dirac-cone 구조를 가짐으로써 위상절연체의 금속성 표면 성질을 발현할 수 있는 소재에 대한 연구가 활발히 진행되었다. Dirac material은 첫번째 brillioun zone 내에 독특한

dirac-like cone 유형의 에너지 밴드 구조를 갖는 물질로, 위상절연체 특성 발현 소재로서 주목을 받았다. 일반 금속 내의 전자와는 다르게 슈뢰딩거 이차식을 벗어나며, 에너지와 모멘텀의 관계식이 일차식을 만족하는 dirac equation을 따른다. 이때 전형적인 전자의 거동에서 벗어난 새로운 유형의 전자를 dirac electron이라고 정의했으며, 이는 위상절연체 표면 에너지 준위를 채우고 벗어나며 전도성을 갖게 하는 주체이다. Dirac electron은 질량이 없고 동시에 전하를 띄는 fermion이기 때문에 외부 자기장의 영향을 받는다는 특징을 지닌다.

초기 연구에 의하면 $\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x}$ 합금이 dirac material로서 위상절연체 소재의 후보군으로 지목되었다. 그러나 dirac point가 여러 개 존재하고, random substitutional disorder을 지니고 있어 이로 인해 표면 구조가 복잡하다는 한계가 있었으며, 합금이기에 벌크 갭 내에 불순물로 인한 밴드가 존재하여 표면 에너지 준위와 겹쳐질 수 있다는 이유로 대체 소재에 대한 연구가 진행되었다. 한편, dirac material 중 간단한 표면 에너지 준위를 지니며, 동시에 stoichiometric crystal을 만족하는 위상절연체 소재인 Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 및 Sb_2Te_3 등이 대표적인 후보 물질로 주목을 받았다 [11]. Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 는 모두 층상구조로 이루어져 있고 rhombohedral 결정 구조를 지닌다는 특징이 있으며, 그 원자 배열은 layered sandwich 구조로 표현될 수 있다. 각 sandwich layer는 일련의 순서를 지니는 다섯 개의 단위자 sheet으로 구성되며, 한 layer를 quintuple layer라고 정의

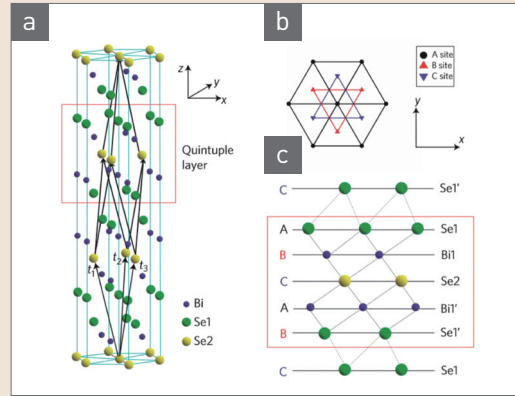


그림 5 ▶ (a) Crystal structure of Bi_2Se_3 with three primitive lattice vectors denoted as t_1, t_2, t_3 , (b) top view along the z -direction, and (c) side view of the quintuple layer structure [11].

한다. Bi_2Se_3 의 경우, $[\text{Se}(1)\text{-Bi}\text{-Se}(2)\text{-Bi}\text{-Se}(1)] - [\text{Se}(1)\text{-Bi}\text{-Se}(2)\text{-Bi}\text{-Se}(1)]$ 의 순서로 quintuple layer가 배열된다(그림 5). 이때 각 layer 간에 작용하는 힘은 van der waals force로 약하기 때문에 잘 끊어지는 반면, layer 내 원자들 사이는 강한 covalent bond 혹은 ionic bond로서 서로 단단하게 결합되어있다. Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 또한 유사한 구조를 갖는다. 세 가지 물질 모두 벌크 밴드갭 내 Γ point에 하나의 dirac cone 형태의 표면 에너지 준위가 존재한다(그림 6).

위상절연체 소재의 발견에서 더 나아가 해당 소재를 공학적으로 적용하고자 하는 연구 또한 보고되었다 [12,13]. 그 중 nanowire와 exfoliated sample은 high performance field-effect transistor를 구현하기 위한 토대로서 제작되었다(그림 7). Bi_2Se_3 nanowire FET의 경우, single crystal nanowire가 소자 내 전도 채널로 사용되었으며, 기존 반도체 nanowire 소자에서 보고된 특성에 비해 우수한 current-voltage

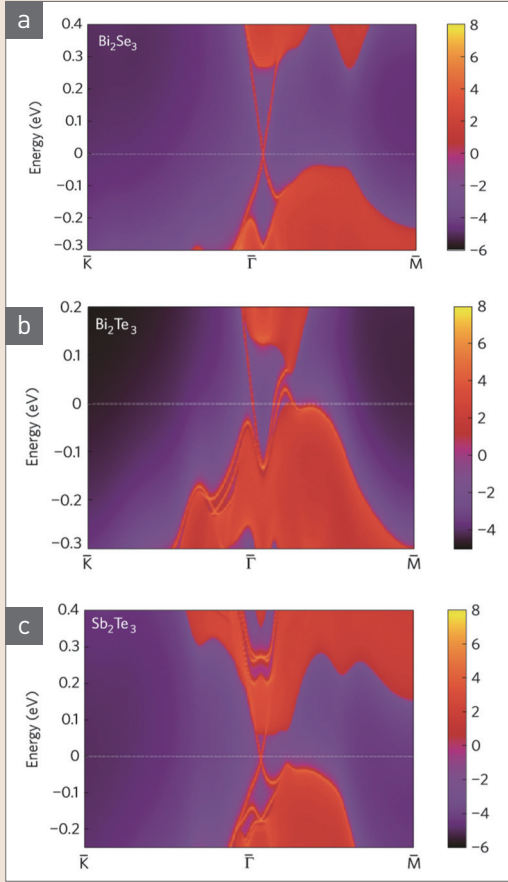


그림 6 ▶ (a) Energy and momentum dependence of the LDOS for Bi_2Se_3 and (b) Bi_2Te_3 , and (c) Sb_2Te_3 [11].

특성을 나타냄을 확인하였다. Sharp turn-on, zero cutoff current, large on/off current ratio 및 well-saturated output current가 이를 증명한다.

그러나 이러한 전도 메커니즘이 오로지 표면의 에너지 준위를 통한 전도라는 사실이 명확하게 입증되지 않았기에, 소자 내 위상절연체 성질 발현 가능성에 대한 연구의 필요성이 제기되었다. 일반적인 소자의 경우, 게이트 전압으로 채널 형성을 컨트롤하며, 이로 인해 해당 소자의 다양한 current-voltage 특성이 나타난다.

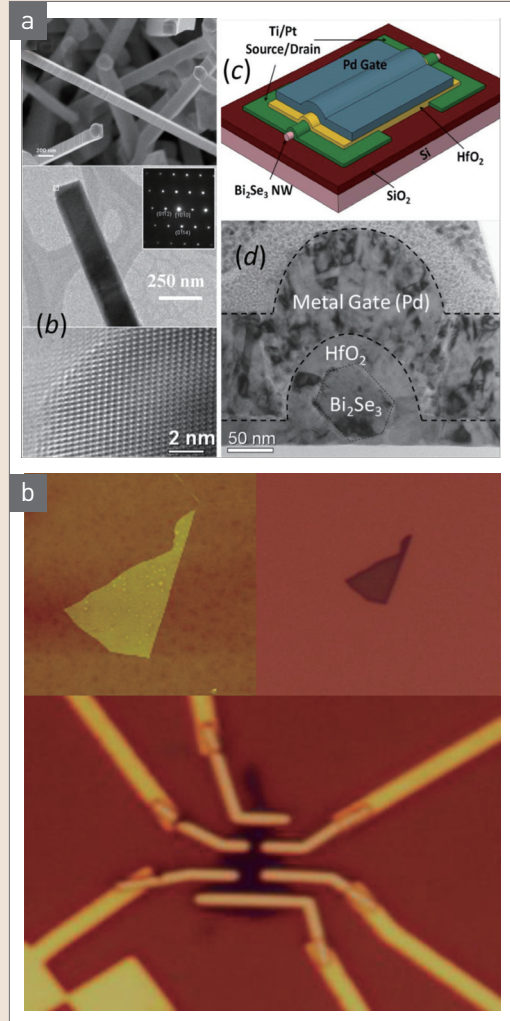


그림 7 ▶ (a) SEM image, HRTEM image of Bi_2Se_3 nanowires, schematic of a Bi_2Se_3 nanowire FET, the TEM image of the cross-section, and (b) atomic force micrograph and optical micrographs of exfoliated Bi_2Se_3 [12,18].

다. 위상절연체를 채널로 사용한 소자의 경우, 게이트에 인가된 전압이 표면에 존재하는 위상절연체 고유의 표면 Dirac fermion에 작용하는 것인지, 아니면 벌크 내 전자에 작용하여 전도성을 갖는 것인지에 대한 의문이 해결되지 않았다. Shubnikov-de Haas oscillation (SdH oscillation)은 표면에 Dirac fermion이 존재함

을 증명할 수 있으며, 게이트에 전압을 인가하였을 때 fermion이 게이트 전압에 의해 컨트롤될 수 있음을 나타내는 지표이다. 보고된 관련 연구에 의하면, 작은 전압 범위 (~10 V) 내에서 발견된 전자와 정공의 cross-over는 SdH oscillation이 일어나는 준위가 벌크의 밴드가 아닌, 표면에 위치함을 의미한다. 이는 벌크 밴드갭은 대략 300 meV로 분리되어 있기 때문에 전자에서 정공으로의 cross-over가 일어나기 위해서는 전압 범위가 한 order보다 더 커야하기 때문이다. 다시 말해서 표면에 oscillation을 갖는 dirac fermion이 존재하고, 게이트에 인가한 전압으로 이를 컨트롤 할 수 있다는 것을 의미한다. 특정 조건 하에서 벌크가 아닌 표면을 통한 전도가 이루어지는 위상절연체 소자의 구현 가능성을 밝힌 주요 연구라 할 수 있다 [14].

4. 위상절연체 한계점 및 연구 동향

현재까지의 반도체 소자 관련 연구개발은 기존 Si 소자의 기본 구조는 유지하며, 일부 소재나 공정을 개선하여, 소자의 성능을 향상시키는 데에 주력하였다. 채널의 길이를 짧게 하거나 높은 유전 상수를 지닌 절연체를 적용하는 등 소자의 dimension을 축소해 왔으며, 이로 인해 집적회로의 집적도가 크게 증가하였다. 더 나아가, 소자를 3차원으로 적층하는 방식으

로 물리적 집적도를 높이고 있다. 그러나 이러한 물리적인 scaling 및 integration 방식은 한계가 존재하며, 따라서 캐리어 자체의 이동도 (mobility)를 높이기 위한 혁신적인 채널 소재 개발이 필수적이다.

위상절연체의 금속성 표면은 캐리어의 이동도를 극단적으로 높일 수 있다는 점에서 주목을 받고 있다. 그러나 표면의 에너지 준위를 통한 전자 전도는 지배적인 벌크 내 전도에 가려져 그 영향이 아주 미미하게 되고, 따라서 금속성 표면을 통한 채널 전류의 제어가 어렵다는 한계점이 있다. 예를 들어, 위상절연체의 성질을 발현할 수 있는 대표적인 물질인 Bi_2Se_3 의 경우, 대략 10^{19} cm^{-3} 의 고농도 selenium vacancy가 존재하고 이는 전자를 제공하는 도너 (donor)로서 작용하여, Bi_2Se_3 는 그 자체로 강한 n형 반도체이며, 페르미 준위가 벌크 전도대 위쪽에 위치한다. 결과적으로 n형 캐리어인 전자의 벌크 내 전도가 지배적이게 되며, 이는 곧 위상절연체 물질인 Bi_2Se_3 의 금속성 표면을 통한 전도가 무시되는 결과를 낳는다. 비슷한 예로 Bi_2Te_3 를 들 수 있다. 앞서 언급한 Bi_2Se_3 와 반대로, Bi_2Te_3 의 경우 Bi 원자가 Te site로 가려는 anti-structure defect을 가지는데, 그 결과 정공의 농도가 거의 10^{19} cm^{-3} 에 이르는 강한 p형 반도체의 특성을 나타내며, 페르미 준위가 가전자대 내에 위치하게 된다 [15]. 이처럼 위상절연체의 금속성 표면을 통한 전도가 벌크 내의 전도에 의해서 가려지고, 이는 결과적으로 위상절연체의 성질이 실제로 소자 내에서 발현되기 어려움을 의미한다.

최근, 표면 전도의 영향을 제고하기 위해 벌크 내 전도를 억제하려는 연구가 활발하게 진행되고 있다. 벌크 페르미 준위가 전도대 혹은 가전자대 쪽으로 치우치는 문제를 극복하고자, 도핑을 통하여 페르미 준위를 벌크 밴드갭 중앙으로 위치하도록 조절하는 연구가 대표적이다 [16]. 즉, 페르미 준위를 tuning함으로써 벌크 내 전도를 억제하여 절연성을 갖게 함과 동시에 표면에서의 지배적인 전도를 유도하는 방법이다. 그러나 도핑을 할 경우, 해당 dopant에 의해 표면에 disorder가 형성될 수 있고 그로 인해 SdH oscillation이 사라질 수 있다. 이처럼 도핑을 통해 페르미 준위를 쉽게 조절할 수는 있지만, 궁극적으로 위상절연체의 고유한 특성이 손실되는 난제에 봉착하였다 [17]. 따라서 각 소재에 적합한 원소를 도핑 하여야 하고, 그 결과 dopant에 의한 표면 에너지 준위의 산란을 최소화하여 금속성 표면을 유지할 수 있는 조건을 만족시켜야 한다. 이를 충족시키기 위해 해당 소재에 다양한 원소를 도핑하는 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 동시에 공정 온도를 조절함으로써 페르미 준위 위치에 영향을 주는 재료 내 결함을 최소화하는 연구 또한 제안되고 있다.

한편, 단순히 벌크 내의 전도 특성을 억제하기 위해 벌크 두께를 매우 얇게 하여 표면의 영향을 증가시키려는 연구 또한 보고되고 있다. 해당 연구에 의하면, Bi_2Se_3 exfoliated thin layer를 3개의 quintuple layer의 두께에 해당하는 대략 3.5 nm의 두께로 제어하여 전계효과 트랜지스터를 제작하였고, 그 결과 극박막

Bi_2Se_3 트랜지스터는 게이트 음전압에서 activation energy barrier가 250 meV에 이르는 전형적인 절연체 성질을 띤다고 보고되었다. 그러나 여기서 주목해야 할 점은 게이트 양전압에서 갖는 전도성이 오로지 표면 준위를 통한 전도의 결과가 아닌, 결국 벌크에 속한 n형 캐리어에 의한 전도가 동시에 영향을 미친다는 점이다 [18]. 따라서 두께 조절을 통한 위상절연체 특성 발현 연구의 경우, 단순히 두께가 얇음으로 인해 벌크 전도가 억제되었다는 것을 넘어서서, 표면 에너지 준위를 통한 전도가 벌크 전도보다 더 지배적이라는 것을 실험적으로 밝히는 것이 해결해야 할 숙제라 할 수 있다.

앞서 살펴본 바와 같이 위상절연체가 그 고유하고, 독보적인 특성으로 인해 큰 주목을 받고 있지만, 공학적으로 적용하는 데에는 여전히 많은 한계점이 존재하고, 이를 극복하고자 하는 여러 연구가 진행되고 있다. 현재까지의 연구 동향에서 다루었던, 개선되어야 할 기술적 사안에 대한 심도 있는 고려는 위상절연체 소자 구현에 있어 필수적인 요소이다.

5. 맺음말

본고에서는 위상절연체의 고유한 특성과 이의 발현이 가능한 소재 및 소자에 대한 연구 동향을 살펴보았다. 향후 금속성 표면의 에너지 준위를 안정하게 유지하며, 동시에 표면을 통한 전기전도가 벌크 내의 전기전도보다 지배

적인 소재 및 소자를 개발한다면, 현재 직면한 Si 기반 반도체 소자의 한계를 극복할 수 있을 것으로 기대된다.

세계적으로 위상절연체에 대한 기초연구는 어느 정도의 진척이 있다. 위상절연체의 물리학적 이론, 위상절연체 성질이 발현될 수 있는

소재의 발견, 그리고 트랜지스터로의 연구 등이 이루어지고 있으며, 앞으로의 연구는 해당 소재가 갖는 각 한계점을 보완하는 한편, 소자 구동 측면에서 위상절연체의 안정성 및 신뢰성을 제고하는 방향으로 이루어져야 할 것이다. 🌐

참 / 고 / 문 / 헌

- [1] C. L. Kane and E. J. Mele, *Phys. Rev. Lett.*, **95**, 226801 (2005).
- [2] C. L. Kane and E. J. Mele, *Phys. Rev. Lett.*, **95**, 146802 (2005).
- [3] J. E. Moore and L. Balents, *Phys. Rev. B*, **75**, 121306 (2007).
- [4] J. E. Moore, *Nature*, **464**, 194 (2010).
- [5] Y. Xu, et al., *Nature Phys.*, **10**, 956 (2014).
- [6] S. Murakami, N. Nagaosa, and S. C. Zhang, *Phys. Rev. Lett.*, **93**, 156804 (2004).
- [7] S. Murakami, *Phys. Rev. Lett.*, **97**, 236805 (2006).
- [8] Y. Ran, Y. Zhang, and A. Vishwanath, *Nature Phys.*, **5**, 298 (2009).
- [9] L. Fu, C. L. Kane, and E. J. Mele, *Phys. Rev. Lett.*, **98**, 106803 (2007).
- [10] A.C.H. Neto, F. Guinea, N. M. Peres, K. S. Novoselov, and A. K. Geim, *Rev. Mod. Phys.*, **81**, 109 (2009).
- [11] H. J. Zhang et al., *Nature Phys.*, **5**, 438 (2009).
- [12] H. Zhu et al., *Scientific Reports*, **3**, 1757 (2013).
- [13] S. S. Hong et al., *Nano Lett.*, **10**, 3118 (2010).
- [14] B. Sacépé et al., *Nature Communications*, **2**, 575 (2011).
- [15] Y. S. Hor et al., *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, **72**, 572 (2011).
- [16] L. A. Walsh et al., *ACS nano*, (2018).
- [17] Z. Ren et al., *Physical Review B*, **84**, 075316 (2011).
- [18] S. Cho, N. Butch, J. Paglione, and M. Fuhrer, *Nano Lett.*, **11**, 1925 (2011).

- [19] N. Nagaosa, *Science*, 318, 758 (2007).
- [20] H. Zahid, *Experiments provide first direct signatures of a topological insulator-a new phase of quantum matter*, <https://www-ssl.slac.stanford.edu/content/science/highlight/2009-03-30/experiments-provide-first-direct-signatures-topologicalinsulator-new> (2009).
- [21] Y. L. Chen and J. G. Analytis, *Science*, 325, 178 (2009).

저/자/약/력



성명	최지현	
학력	2019년 2019년 ~ 현재	한양대학교 재료화학 공학사 한양대학교 재료화학 석박사 통합과정



성명	박태주	
학력	2002년 2008년	서울대학교 재료공학부 공학사 서울대학교 재료공학부 공학박사
경력	2008년 ~ 2011년 2011년 ~ 2015년 2016년 ~ 현재	University of Texas 박사후 연구원 한양대학교 재료공학과 조교수 한양대학교 재료공학과 부교수