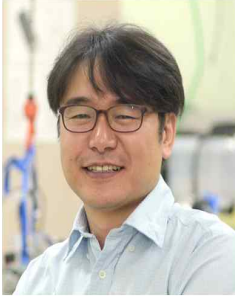


GIST·표준연 등, 양자물질 속 '수수끼끼 신호' 정체 밝혔다

- 위상절연체 나노선 속 '맥놀이' 신호 원인 세계 최초 규명
- 위상·일반 전자 상태의 양자간섭 입증... 양자소자 신호 해석·설계에 새 기준 제시
- 국제학술지《Nano Letters》26권 29호 게재·표지논문 선정



GIST 물리광학과
최상준 교수



한국표준과학연구원
배명호 박사



충남대학교
물리학과
송종현 교수



충남대학교
권두혁



한국표준과학연구원
박완기 박사



국립공주대학교
데이터정보물리학과
송태근 교수

▲ GIST·KRISS 등 '위상절연체 나노선 양자간섭' 연구에 참여한 공동연구진이다.

광주과학기술원(GIST·지스트, 총장 임기철)과 한국표준과학연구원(KRISS, 원장 이호성) 등 국내 연구진이 위상절연체 나노선에서 수년간 양자신호 해석의 큰 걸림돌이었던 '맥놀이' 신호의 발생 원인을 세계 최초로 규명했다고 밝혔다.

분석 결과, 표면의 위상 전자 상태와 그 아래 일반 전자 상태가 만든 서로 다른 양자진동이 겹치면서 맥놀이가 발생한 것으로 확인됐다. 이번 성과는 위상 양자소자의 신호 해석과 원하는 전자 상태 구현에 필요한 기준을 제시한다.

위상절연체는 내부에서는 전기가 잘 흐르지 않지만 표면에는 특수한 전자 상태가 존재하는 양자물질이다. 이를 가느다란 나노선으로 만들면 표면 전자가 둘레를 따라 이동하고, 자기장을 가했을 때 서로 다른 경로를 지난 전자의 파동이 간섭해 전도도가 규칙적으로 변하는 '아하로노프-봄(Aharonov-Bohm, AB) 진동'이 나타난다.

그런데 실제 위상절연체에서는 도핑 등의 영향으로 표면 바로 아래에도 전자가 흐르는 얇은 층이 생길 수 있다. 이 층 역시 전자의 이동 경로가 될 수 있지만, 위상 표면 상태와 함께 AB 진동에 참여하는지는 그동안 불분명했다.

이 의문을 풀 단서는 열전 실험에서 나왔다. 연구진은 안티몬(Sb)을 첨가한 비스무트 셀레나이드(Bi_2Se_3) 나노선에서 AB 진동이 열전 현상에서도 나타나는지 확인하던 중 '맥놀이'를 발견했다.

맥놀이는 주기가 조금 다른 진동들이 겹쳐 두 소리굽쇠가 '웅-웅-' 소리를 내듯 신호 세기가 변하는 현상으로, 예상하지 못한 다른 진동 성분의 존재를 포착한 결정적 단서였다.

이를 바탕으로 기존 전기전도 데이터를 다시 분석한 결과, 동일한 맥놀이 현상이 존재하고 있었음을 재확인했다.

수년에 걸친 추적과 분석 끝에 연구진은 맥놀이가 '위상 표면 상태(TSS)'와 표면 아래 일반 전자층인 '2차원 전자기체(2DEG)'에서 비롯된 진동 성분들이 겹치며 나타난다는 결론을 내렸다.

두 전도 상태를 지나는 전자 경로가 나노선을 감싸는 면적이 미세하게 달라 서로 다른 주기의 진동이 생기고, 이들이 중첩되어 맥놀이를 일으킨다는 사실을 밝혔다.

검증의 관건은 진동수였다. 진동수는 전자가 나노선을 감아 도는 경로의 면적에 따라 정해지므로, 게이트 전압으로 전자의 상태를 바꿔도 경로 면적이 그대로라면 진동수 역시 유지돼야 한다. 하지만 인접한 진동들이 겹쳐 기존 주파수 분석으로는 이를 구분하기 어려웠다.

이에 공동연구진인 국립공주대학교 송태근 교수팀은 머신러닝을 이용해 기존 분석에서 뭉쳐 보이던 진동 성분을 분리했고, 게이트 전압에 따라 맥놀이 무늬가 변해도 각 진동수는 고유하게 유지됨을 확인했다. 이론 계산도 관측된 특성을 재현했으며, 별도 나노선 소자에서도 같은 현상이 검증됐다.

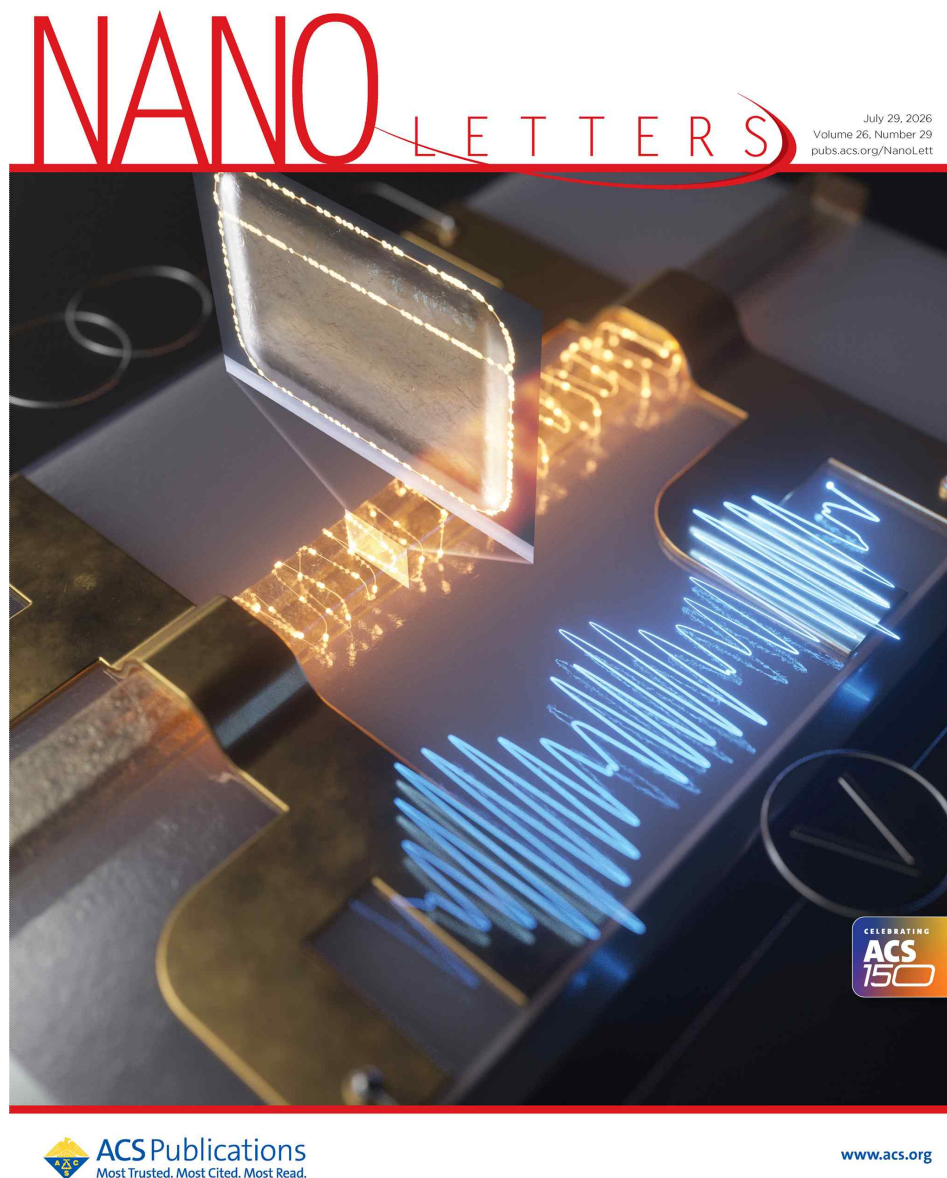
이번 연구는 위상 표면 상태를 확인하는 주요 신호로 활용돼 온 AB 양자간섭에 일반 전자 상태도 참여할 수 있음을 명확히 입증한 성과다. 이를 통해 향후 위상절연체의 양자수송 신호를 오차 없이 정확히 해석하고, 원하는 양자 상태를 정밀하게 제어하기 위한 명확한 기준을 제시했다.

KRISS 배명호 책임연구원은 "전자가 위상 상태뿐 아니라 일반 전자 상태도 오가며 양자간섭할 수 있음을 보여준 성과"라며, "원하는 위상 상태만 활용하려면 일반 전도 상태가 개입하지 않도록 도핑과 게이트를 정밀하게 제어하는 것이 중요하다"고 말했다.

GIST 최상준 교수는 "각 기관 연구진의 실험·이론·데이터 분석 역량이 맞물려 수년간 풀리지 않았던 맥놀이의 원인을 하나의 물리적 그림으로 설명한 성과"라며, "서로 다른 전자 상태의 간섭을 이해하고 제어하는 원리는 향후 위상 양자소자 설계에도 활용될 수 있을 것"이라고 설명했다.

이번 연구는 ▲한국표준과학연구원 기본사업 ▲한국연구재단(NRF) 지원사업 ▲교육부 G-LAMP 사업 ▲국가과학기술연구회(초연결확장형 슈퍼양자컴퓨팅 전략연구단) 사업의 지원을 받았다.

관련 성과는 7월 29일(수) 발행된 《Nano Letters》 제26권 29호에 게재돼 표지논문으로 선정됐다.



▲ GIST·KRISS 등 공동연구진의 '위상절연체 나노선 양자간섭' 연구가 'Nano Letters' 표지논문으로 선정됐다.

논문 정보

○ 논문명, 저자정보

- 저널명 : Nano Letters(IF: 9.1.)
- 논문명 : Aharonov-Bohm Beating Induced by Coexisting Topological Surface States and 2DEG in Sb-Doped Bi₂Se₃ anowires
- 저자 정보 : 권두혁(공동제1저자, 충남대·KRISS), 박완기(공동제1저자, KRISS), 송태근(공저자, 국립공주대), 도용주(공저자, GIST), Dong Yu(공저자, 미국 UC Davis), 송종현(공동교신저자, 충남대), 최상준(공동교신저자, GIST), 배명호(공동교신저자, KRISS)