극저온 고자기장 주사터널 현미경의 소개

DOI: 10.3938/PhiT.24.038

함 응 돈

Introduction to the Ultra-low-temperature High-magnetic-field Scanning Tunneling Microscope

Ungdon HAM

Progress with our ultra-low-temperature high-magnetic-field scanning tunneling microscope (ULT HF STM) will be presented. Equipped with a vector superconducting magnet of 9+2+2 T and a cryostat with strong cooling power (800 microWatt at 100 milliKelvin), our ULT HF STM will carry out experiments at temperatures lower than those that other ULT HF STM's in the world can reach. With a high-energy resolution capability (~ a few microelectron volts), we expect to study phenomena, such as the hyperfine interaction between an unpaired electron spin and a nuclear spin, on a very fine energy scale.

서 론

본 연구단은 원자수준에서 제어된 저차원 전자계를 성장/제작하고, 전자상호작용과 스핀-궤도 상호 작용이 조절되어 대칭성 붕괴와 토폴로지 성질이 구현된 새로운 종류의 저차원 전자계의 기저상태를 연구하고자 한다. 이를 위해서는, 새로운 저차원 전자계의 원자, 전자, 스핀 구조를 정밀하게 측정하기 위한 높은 공간/에너지/스핀 분해능이 요구된다. 이 요구를 만족시키는 측정 장비 중의 하나로, 실험실에서 높은 공간 분해능을 가져 저차원 전자계의 원자구조를 정밀하게 측정하는 주사 터널 현미경을 들 수 있다. 또한 주사 터널 현미경의 기본 기능의 하나인 주사 터널 분광법을 이용하면, 저차원 전자계의

전자구조를 높은 에너지 분해능으로 측정할 수 있다.

이러한 주사 터널 현미경의 측정을 극대화하기 위해서는, 먼저 온도에 의한 열적 요동을 최소화하는 것이 중요하다. 열적 요동이 최소화된 조건에서는 미세한 전자적 구조를 가지고 있는 다양한 저차원 전자계의 기저상태 및 물성을 정밀하게 측정할 수 있게 된다. 또한 자기장의 세기가 증가하면, 열적 요동이나 불순물 산란효과가 상대적으로 약화되므로 더 정밀한 전자구조의 검출이 가능해진다. 정리하면, 높은 에너지 분해능을 가지는 주사 터널 분광법을 이용한 저차원 전자계의 전자 구조 규명을 위해서는 자기장과 온도의 비가 높은 극저온 고자기장 환경이 필요하다.

이와 더불어 저차원 전자계의 기저 스핀 상태를 관측하기 위해서는 스핀 분해능을 가져야 한다. 주사 터널 현미경의 탐침에 자성물질을 덧입혀서 발생하는 스핀 편극된 터널링 전류가 탐침과 시료의 상대적인 자기화 방향에 따라 변하는 것을 이용해서, 저차원 전자계의 다양한 스핀 상태를 원자 분해능으로 측정할 수 있다. 탐침과 시료의 자기화 방향이 서로 수직이면 스핀 분해능은 사라지게 되므로, 스핀 분해능을 극대화할 수 있도록 자기장의 방향을 시료의 자기화 방향에 따라 3차원 방향으로 바꿀 수 있는 벡터 자기장 환경이 요구된다. 이런 이유로 본 연구단은 높은 공간/에너지/스핀 분해능을 가진 극저온 고자기장 주사 터널 현미경을 구축 중에 있다.

주사 터널 현미경은 서브 옴스트롱의 우수한 공간적 분해능을 보유하여, 1986년 노벨상을 수상한 이래, 지난 삼십여 년간 많은 발전을 해왔다. 90년대의 4 켈빈에서 작동 가능한 저온 주사 터널 현미경, 2000년대의 서브켈빈 고자기장 주사터널 현미경 등의 저온 주사터널 현미경의 발전은 그 한 예이다. 표 1에 보이듯이, 2010년대에서는 수십 밀리 켈빈 이하의 온도와 10 테슬라 정도의 고자기장 하에서 작동 가능한 주사터널 현미경이 몇몇 세계 선도 그룹에서 개발되기 시작하였다.^[1-3]

저자약력

함응돈 박사는 2007년 University of California, Irvine, 물리 천문학과에서 박사학위를 받았다. 현재 기초과학연구원 원자제어 저차원 전자계 연구단에서 연구위원으로 재직하고 있으며, 주된 연구 대상은 극저온 고자기장 주사 터널 현미경을 이용한 단일 스핀의 검출 및 스핀 조작이다. (uham@ibs.re.kr)

REFERENCES

- [1] Y. J. Song, *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **81**, 121101 (2010).
- [2] S. Misra, *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **84**, 103903 (2013).
- [3] M. Assig, *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **84**, 033903 (2013).

Table 1. Comparison of other ULT HF STM.

Ref	설치 기관명	국가	연도	최저 온도	자기장	비고
1	NIST	USA	2010	9 mK	15 T	top loading
2	MPI	Germany	2013	7 mK	14 T	bottom loading
3	Princeton Univ.	USA	2013	8 mK	14 T	bottom loading

정리하면, 본 연구단에서 구축 중인 극저온 고자기장 주사터널 현미경은, 서브 옴스트롱의 공간 해상도를 기반으로 하여, 수 마이크로 전자볼트까지의 높은 에너지 분해능을 기본적으로 가지게 되어, 기존의 분석 장비로는 측정이 불가능한 영역까지 연구할 수 있게 하는 중요한 표면 분석 장비이며 선도 그룹들만이 보유하고 있는 최첨단 장비라고 할 수 있다. 본 논문에서는 원자제어저차원 전자계 연구단에서 구축 중인 극저온 고자기장 주사터널 현미경의 소개와 함께 향후 연구하려는 주제에 대해 간단히 언급하려 한다.

본 연구단의 극저온 고자기장 주사터널현미경

극저온 고자기장 주사 터널 현미경은 주사 터널 현미경 스캐너 부분을 제외하고, 크게 냉동기와 초전도 자석, 초고진공 챔버 및 무진동설비로 이루어져 있다. 자세한 요구 성능은 아래와 같다.

- 최저 온도: 저차원 전자계의 기저상태 측정 시 열적요동현상을 최소화하기 위해 극저온 환경이 필요하다. 현재 고자기장 하에서 구현 가능한 최저 온도인 10 mK 수준 또는 그 이하의 실험 온도를 구현하려 한다. 본 연구단의 극저온 고자기장 주사터널현미경을 위한 냉동기는 미국 Janis사의 희석형 냉동기(dilution refrigerator)로서, 2015년 현재 제작 중에 있어서, 2015년 후반기에 최종 테스트가 끝나고 배송이 될 예정이다. 강력한 냉동 능력(100 밀리켈빈에서 800 마이크로와트)을 보유하게 되어, 기존 국내외의 극저온 고자기장 주사 터널 현미경들보다 더 낮은 온도에서 실험을 수행할 수 있게 하는 것이 목표이다. 그림 1에 보이듯이, 액체 질소 듀어와 액체 헬륨 듀어의 용량을 최적화하여, 48시간 이상의 극저온 연속 실험이 가능하게 설계하였다.

- 벡터 자기장: 저차원 전자계의 양자상태를 보다 정밀하게 관측하고 다양한 방향의 스핀 분해능을 확보하기 위해서 벡터 자기장이 필요하다. 지만 효과를 극대화하기 위해 수직방향의 초전도 전자석 솔레노이드가 9 테슬라의 고자기장을 만들어 내고, 두 개의 초전도 헬름홀츠 코일과 솔레노이드가 함께 동작하여 3차원의 2 테슬라의 벡터 자기장 환경을 조성한다.(9

Fig. 1. Schematic of Cryostat and Superconducting Magnet.

Fig. 2. Schematic of Vibration Isolation.

+2+2 테슬라). (그림 1 참조)

- 역학적 안정성: 원자 - 스핀 조작을 위해서는 높은 안정성이 필요하다. 1 피코미터($1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m}$) 이하의 높은 안정성을 위해서 세계적 수준의 무진동설비가 필요하다. 이에 2014년 12월에 고자기장 주사 터널 현미경을 위한 무진동 설비가 완료되었다. 그림 2에 보이는 것처럼, 효과적인 진동 방지를

Fig. 3. Schematic of Overall System.

위해서 3단계 진동 방지 기법을 사용하였다. 40톤의 콘크리트 블록을 수동 진동 방지 장치가 지지하게 되며, 그 위에 8톤의 광학 테이블이 능동 진동 방지 장치에 의해서 작동하여, 외부에서 전달되어 오는 진동을 최소화하게 하였다.

본 장비의 하단부는 사용자가 팀과 샘플을 4 켈빈 온도에서 미리 확인한 후, 극저온 냉동기 내부로 이송하여 장착하여 밀리켈빈 온도와 고자기장을 샘플에 인가할 수 있는, 소위 바텀 로딩(bottom loading) 형식의 장비이다. (그림 3 참조) 상온 및 4 켈빈 온도에서, 팀 샘플을 육안으로 보면서 안전하게 교체할 수 있게 하였고, 샘플 기판 위로 각종 원자 및 분자 증착이 용이하게 설계하였다. 또한 진공 챔버 내부에 단결정 샘플실험을 위한 스캐너뿐만 아니라, 각종 전자 수송 실험 등의 다전극 샘플의 실험에 최적화된 각종 스캐너를 여러 대 설치하여, 여러 형태의 측정이 가능하게 하려 한다. (그림 4 참조) 2015년 후반기에 스캐너의 실제 제작에 들어갈 예정이다.

또한, 극저온 고자기장 주사터널 현미경의 하위 장비들로서, 4 켈빈에서 작동하는 주사터널 현미경 및 튜닝 포크 형 원자간 힘 현미경, 샘플에 여러 전극을 부착시켜 전자 수송현상을 측정하는 전자 수송 주사 터널 현미경, 주사 터널 현미경의 터널 정션에서 비탄성 전자 터널 현상에 의해서 발생하는 광자를 측정하여 그 에너지 분석을 할 수 있는 광자 주사 터널 현미경, 그리고 1 켈빈온도에서 7 테슬라의 자기장을 인가할 수 있는 서브 켈빈 고자기장 주사 터널 현미경을 구축 중에 있어, 극저온 고자기장 주사터널 현미경의 운용을 극대화하려 한다.

Fig. 4. Schematic of STM scanner for Ultralow Temperature High Magnetic Field Scanning Tunneling Microscope.

향후 연구방향

극저온 고자기장 주사터널 현미경의 주된 연구 대상은 무궁무진하다 할 수 있다. 본 장비의 주된 장점인 수 마이크로 전자볼트 수준의 높은 에너지 해상도를 보여줄 수 있는 한 가지 예로는, 단일 스핀 센터에서의 초미세 상호작용의 검출과 그 조작으로 들 수 있다.^[4] 즉, 원자핵 스핀과 이를 둘러싸는 전자 스핀과의 상호 작용인 초미세 상호작용은 그 에너지 크기가 수십 마이크로 전자볼트 이하라서, 기존의 분석 장비로는 단일 스핀 센터 및 그 주변 환경의 원자적 해상도로 검출이 불가능하였다. 본 연구단의 극저온 고자기장 주사터널 현미경으로는 단일 스핀 센터와 그 주변 환경을 서브 옹스트롱의 공간적 해상도로 검출해내어, 그 스핀 센터에서 발현되는 초미세 상호작용을 검출 및 그 스핀 상태의 조작에 도전하려 한다. 이뿐만 아니라 각종 단일 스핀 센터에서 발현되는 스핀 관련 현상을 검출하여, 미래 스핀트로닉스의 기초를 다지는 역할을 할 수 있을 것이다.

결론적으로, 극저온 및 고자기장 환경과 높은 역학적 안정성을 제공하는 무진동설비로부터 완성되는 극저온 고자기장 주사형 터널현미경은, 높은 공간/에너지/스핀 분해능을 통하여, 본 연구단에서 연구하게 될 저차원 전자계의 전자구조 연구뿐만 아니라, 양자물성, 반도체, 자기물성, 스핀트로닉스, 재료공학 등 다양한 분야의 연구에도 활용될 수 있는 장비라 할 수 있다.

REFERENCES

- [4] R. Vincent, et al. Nature **488**, 357 (2012).