SI-STM을 이용한 고온 초전도 현상의 연구

DOI: 10.3938/PhiT.26.010

이진호

An Overview of Current Research on the High-Temperature Superconductivity Using SI-STM

Jinho LEE

Throughout the history of superconductivity, tunneling has been one of the most important experimental tools of choice. Examples include the first tunneling experiment on the superconductor-insulator-superconductor (SIS) junction made of superconducting aluminum, experiments on Josephson tunneling, and many others. In 1981, scanning tunneling microscopy, which can visualize atomic corrugations, was invented. Meanwhile, in 1986 copper based high-temperature superconductors, known as cuprates with perovskite structures, were discovered and so began the era of high-temperature superconductivity (HTSC). Twenty years after the discovery of superconducting cuprates, yet another new superconductor has come to light in the ferropnictide family, which contains FeAs layers. Experimentally, HTSC phenomena have revealed many physical properties different from those of conventional superconductors, and theory-wise, none of the theoretical models has successfully explained all the experimental results for HTSC as of the time this review was written. Iron based superconductors including ferropnictides have many similarities to cuprates, such as their phase diagram, 2D properties, and the anti-ferromagnetic (AF) nature of the parent compounds. Distinguishing characteristics, such as gap symmetry, conducting parent compounds, and multi-band characters, are clearly observed. In this review, we will focused

on the contributions of the spectroscopic imaging scanning tunneling microscopy (SI-STM) to HTSC research. With the development of SI-STM, sub-atomic distributions of various physical quantities can be surveyed in the form of “maps” because one can acquire spectroscopic information at each and every topographic point. Moreover, implementing a Fourier-transform of the spectroscopic map, one can also explore k-space information in great detail. Recently, the scanning Josephson tunneling microscopy (SJTM) technique, which is related to both SI-STM and the Josephson effect, has succeeded in verifying the existence of a pair density wave (PDW) in the $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ cuprate. A theoretical explanation of the PDW can provide an important insight into the mechanism responsible for the HTSC.

High Temperature Superconductor

1911년 Onnes^[1]에 의해 수은에서 최초로 초전도 현상이 발견된 후(그림 1 참조) 많은 물리학자들은 이 전기저항이 완전히 사라지는 전례 없는 현상의 원리를 밝히고자 많은 노력을 하였다. Einstein, Feynman 등 당대의 유명한 이론 물리학자들의 시도에도 불구하고 초전도 현상의 원리 규명은 오랫동안 실마리를 잡지 못했다. 그로부터 약 46년이 지난 1957년, Bardeen-Cooper-Schrieffer는 BCS 이론을 제시하여 conventional 초전도의 매커니즘을 밝혀내었다.^[2] 이후 약 30년간 BCS 이론이 예측한 초전도 최고 임계 온도 약 30 K가 정론으로 받아들여지며 초전도체 현상의 원리 규명은 모두 해결된 것으로 생각되고 있었다. 그러나 1986년 초전도 분야는 새롭고도 놀라운 국면을 맞이하게 되었다. Bednorz와 Müller는 구리 화합물인 $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ 가 임계온도가 BCS가 예측한 최고 임계온도보다 높은 온도에서 초전도상으로 전이되는 고온 초전도체(High Critical Temperature

저자약력

이진호 교수는 미국 오스틴의 텍사스 대학에서 2002년 고체물리학실험 전공으로 박사 학위를 취득한 이후, 2011년까지 브룩헤이븐 국립 연구소에서 연구원으로 재직 후, 2012년 귀국하여 서울대학교 교수로 현재까지 재직 중이다. 구리 화합물, 철 화합물 등 고온 초전도체의 주사터널링현미경 관련 논문을 써 냈고, 최근에는 초전도체의 원인인 쿠퍼쌍을 실험적으로 최초로 발견한 논문을 게재하였다.(jinholee@snu.ac.kr)

REFERENCES

- [1] H. K. Onnes, Leiden Comm. **120b**, **122b**, **124c** (1911).
- [2] J. Bardeen, L. N. Cooper and J. R. Schrieffer, Phys. Rev. **108**, 1175 (1957).

Fig. 1. A brief History of the superconductivity. Numerous Nobel prize medals were awarded to many brilliant researchers for their contributions related to the superconductivity.

Superconductor; HTSC)임을 발견한다.^[3] 그 후 계속된 연구로 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$, $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$, $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$, $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta}$ 등 많은 Perovskite 구조의 세라믹 화합물들에서 액체 질소 온도보다 훨씬 높은 온도에서도 초전도의 특성이 나타남을 확인하였다. 이와 더불어 다양한 실험적 장비들을 사용하여, 구리 계열의 고온 초전도체가 지닌 물리적 특성을 포괄적으로 이해하기 위한 연구들이 진행되었다. 그 결과, 이들 구리 계열 고온 초전도체들은 반자성 절연체인 모화합물, $\text{dx}_2\text{-y}_2$ wave 갭, 그리고 준 갭 상태의 존재 등 기존의 초전도체와 판이하게 다른 물리적 성질들을 가지고 있음이 밝혀졌다. 이와 같은 다양한 특성들은 conventional 초전도 현상의 메커니즘을 밝혀낸 phonon을 매개로 한 쿠퍼쌍을 제시하는 BCS 이론으로는 설명이 불가능하였다. 이에 다양한 이론적 모델들이 제시되었지만, 모든 고온 초전도체의 특성들을 통일적으로 설명할 수 있는 모델은 아직 나타나지 않고 있다. 한편, 2008년 Hosono 등은 ferropnictide 계열인 $\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ 에서 고온의 초전도 현상을 발견하는데, 임계온도는 기존의 초전도체와 구리 계열 고온 초전도체의 중간 정도이며 FeAs가 주요 층을 이룬다.^[4] 이후 As 이외에도 P, Se 또는 Te이 Fe과 주요 층을 이루는 ferropnictide 계열의 초전도체들이 발견되었다. Ferropnictide 계열은 임계온도가 50 K 이상까지 도달하며 $\text{Gd}_{1-x}\text{Th}_x\text{FeAsO}$ 의 경우 임계온도 56 K를 기록하였다.^[5] 최근에는 Fe과 Se 기반의 ferrochalcogenides 중 단일 필름에서 53 K에서 100 K까지의 임계온도가 확인되어^[6] 고온초전

도 현상에 대한 놀라움은 진행 중이다. 이러한 철 기반 초전도체는 구리화합물이 아닌 다른 물질에서도 고온 초전도 현상이 일어남을 보임으로써, 또 다른 종류의 고온 초전도의 발견 가능성을 시사한다는 점에서 매우 흥미롭다. Ferropnictide와 구리 계열 고온 초전도는 이차원의 초전도 특성, 상태도, 그리고 반강자성의 모 화합물 등의 유사함이 있다. 하지만 구리 계열 고온 초전도체의 경우 절연체의 모 화합물, $\text{dx}_2\text{-y}_2$ wave 갭 그리고 단일 d_{xy} band 구조 등의 특성을 지닌 반면에, ferropnictide는 금속성의 모 화합물, $\pm s$ wave 갭, 그리고 multi band 구조 등의 상반된 특성을 보인다는 점에서 차이점도 존재한다.

Tunneling and STM

Glaever가 고체물질 전자들의 터널링을 최초로 실험적으로 증명한 후,^[7] 터널링을 이용한 실험기술에서는 혁신적인 돌파구가 생긴다. 1981년 Binnig과 Rohrer는 고체 표면을 원자단

REFERENCES

- [3] J. G. Bednorz and K. A. Müller, *Zeitschrift für Physik B - Condensed Matter* **64**, 189 (1986).
- [4] H. Hosono *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.* **130**, 3296 (2008)
- [5] C. Wang *et al.*, *Europhys. Lett.* **83**, 6, 67006 (2008).
- [6] Jian-Feng Ge *et al.*, *Nature Materials* **14**, 285 (2015)
- [7] I. Glaever, *Phys. Rev. Lett.* **5**, 147, 464 (1960).

위로 측정, 시각화할 수 있는 주사 터널링 현미경(Scanning Tunneling Microscopy-STM)을 발명하였는데,^[8] STM은 또한 전압을 변화시킬 때의 전류 변화를 측정하여 spectroscopy를 할 수 있음이 알려지면서 그 유용성이 확대되었다. STM이 측정하는 differential conductance(dI/dV)는 density of states (DOS)에 정비례하는 값으로, 전통적인 STM은 원하는 위치들에서만 DOS 정보의 획득이 가능하였다. 다시 말해 기존의 STM은 표면에서 topographic image를 완성한 후, 특정한 위치로만 팁을 이동시켜 팁과 샘플 사이의 전압에 따른 전류를 측정하였다. 반면, 상대적으로 최근에 개발된 Spectroscopic Imaging Scanning tunneling Microscopy(SI-STM)는 이러한 STM의 한계를 극복하여 다양한 에너지에 따른 DOS를 '지도'(map)의 형태로 나타낼 수 있으며, 이를 local density of states(LDOS) map이라 부른다. 특정 전압에서 전류 값을 알면, lock-in 증폭기를 통해 dI/dV 값을 얻을 수 있고 SI-STM은 피드백을 통해 tip의 위치를 옮긴 후, 피드백을 제거하여 팁의 위치와 높이를 고정시킨다. 다음으로 다양한 전압에서의 터널링 전류들의 값을 획득하고, 동시에 lock-in 증폭기를 이용하여, 신호대 잡음비가 높은 dI/dV , DOS 측정이 이루어진다. 여기에는 일반적으로 약 100여 개의 다른 전압 값을 사용한다. 위의 과정을 모든 위치들에서 실행하면 topographic image와 동시에 LDOS map을 획득하게 된다. 그 결과 SI-STM은 원자의 실 공간 구조뿐 아니라 물질의 전자 구조를 원자단위로 시각화하는 점에서 STM을 통한 분광법, Spectroscopic Tunneling Spectroscopy(STS)에 혁신을 일으켰다. 일반적으로 한 위치에서 dI/dV spectrum을 측정하는데 약 5초의 시간이 걸린다고 가정하면, 256×256 해상도의 map을 만드는 경우, 65000 화소 이상에서 측정이 이루어지므로 LDOS map을 완성하기 위해서 약 90시간(약 4일)을 소요한다. 따라서 우수한 양질의 데이터를 얻기 위해서는 전기적 및 음향적 잡음의 차단과 극단적으로 낮은 진동 및 온도의 환경이 필수적이다.

SI-STM on HTSC

앞에서 언급한 바와 같이, SI-STM은 기존의 STM과는 달리 모든 화소들에서 LDOS와 같은 분광학적 정보를 획득할 수 있다. 그 결과 다양한 물리적 값의 분포 정보를 지도(map)의 형태로 표현할 수도 있는데, 그 이점 중 대표적인 예로 불순물들의 정확한 위치 측정을 들 수 있다. 일반적으로 불순물들은 topographic image에서 쉽게 확인이 가능한 경우가 많고(그림 2(a)) 예컨대, 도핑을 위해 첨가하는 dopants, 혹은 기존 물질에 다른 성질을 부여하기 위해 넣어진 첨가물 등의 경우가 있다. 한편 이들 불순물은 LDOS map 상에서 topograph에서는

Fig. 2. (a) Topographic image of $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ (non-superconductor) (b) LDOS map at -10 meV with same material in (a). Field of view is $29 \text{ nm} \times 29 \text{ nm}$. Impurities on surface are identified in both topo and LDOS images.^[9] (c) Local density of states at $V = -1.5$ meV. Bright patterns indicate Zn impurity states. (inset) Average dI/dV spectrum in the region of the Zn impurity. Superconductivity is suppressed near non-magnet Zn dopant. (d) Magnified LDOS near Zn atom. Bright center coincides with Cu atoms in CuO_2 plane.^[10] (e) Local density of states at $V = -0.96$ eV. Bright peaks indicate oxygen dopants. (inset) dI/dV spectra at impurity (red curve) and far from impurity (black curve). (f) Gap map (average gap = 65 meV) with oxygen dopants (white dots). Gap range is $20 \text{ meV} < \Delta < 70 \text{ meV}$.^[12] From [10], Reprinted by permission from Macmillan Publisher Ltd: Nature 403: 746-750, copyright 2000. From [12], Reprinted with permission from AAAS.

관측이 안 되는 특이한 물결 모양의 준입자의 산란을 보여주는 소스로 작용하기도 한다(그림 2(a), (b) 비초전도체인 $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ 의 경우 참고).^[9] 한편, 만약 이들 불순물들이 LDOS에 미치는

REFERENCES

- [8] G. Binnig and H. Rohrer, Reviews of Modern Physics **59**, 615 (1987).
- [9] Jinho Lee *et al.*, Nature Physics **5**, 800 (2009).

Fig. 3. (a) A typical map of d^2I/dV^2 modulation of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ integrated over energy 40 meV ~ 60 meV.^[13] (b) Ratio map of LDOS(+Energy) to LDOS(-Energy). The energy value is pseudo gap. C_4 symmetry is broken.^[14] (c) 96 nm square topographic image of $\text{Ca}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$. (d) Current image at 50 meV in same field of view with (c). Twin boundary which passes diagonally is visible in current image. (inset) Autocorrelations of different regions. Distance between bright peaks is $8a_0$.^[15] From [15], Reprinted with permission from AAAS.

영향이 미미하거나 특정한 에너지의 LDOS에만 영향을 줄 경우, topographic image를 통해 발견하기 어려운 경우가 많다. 이런 경우, 오직 에너지 별로 얻어진 LDOS map을 이용하는 방법으로는 불순물들의 관찰이 가능하다. 그림 2(c)는 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ 의 -1.5 mV에 해당하는 LDOS map으로, 불규칙적으로 존재하는 Zn, Ni 등의 불순물들을 확인할 수 있다.^[10,11] 이 두 종류의 불순물들은 Fermi level 근처에서 확인이 되며, CuO_2 면에 있는 Cu 원자를 stoichiometric하게 대체한다(그림 2(d) 참조). 비자성의 Zn가 초전도를 억제하는 반면, 자성의 Ni은 초전도를 억제하지 않는다^[10,11]는 것에서 흥미롭다 하겠다. 다음 예로 SI-STM은 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ 의 전자의 공극인 Hole들을 주는 dopant인 산소 음이온들의 위치도 확인하였는데, 그림 2(e)는 LDOS map($V = -0.96$ eV)으로 이들 non-stoichiometric 산소 dopant들이 밝은 점으로 나타나는 것을 보여주며 이를 통해 이들 산소 dopant들이 국소적으로 전자구조에 어떤 영향을 미치는가에 대한 연구를 가능케 하였다. 또한 SI-STM은 국소적으로 초전도 갭의 크기를 측정할 수도 있다. 그림 2(f)는 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ 의 갭, 혹은 $\Delta_1(\vec{r})$ map(여기서 갭(Δ)은 국소적으로 측정된 coherence peak의 에너지 값을 위치의 함수로 나타낸 map으로서 이는 기존의 터널링을 통해 초전도 갭

크기를 측정하는 방법을 따른 것이다.)으로, dopant들의 위치도 같이 포함되어 있다. $\Delta_1(\vec{r})$ map을 통해, 고온 초전도체는 갭이 공간적으로 비 균등하게 분포하고 있음을 발견하였으며 그림 2(f)에서 non stoichiometric 산소들과 갭의 크기 간의 상관관계가 보인다. 이와 같은 dopant들은 초전도체의 높은 임계 온도에 중요한 작용을 하는 것으로 보인다.^[12]

LDOS(dI/dV)에서 한 단계 더 나아가 d^2I/dV^2 값을 통해 보존과 전자들의 상호작용 정도도 측정할 수 있다. 그림 3(a)는 SI-STM으로 d^2I/dV^2 를 측정 후 초전도 갭을 0 mV로 renormalize하여 지도(Ω map)의 형태로 나타낸 것이다. 이는 전자(준입자)와 보존 간의 상호작용 에너지를 국소적으로 보여주고 있다.^[13] 그림 3(b)는 에너지의 부호는 반대이나 절대값이 같은 두 LDOS의 비율을 나타낸 map으로, 이를 통해 C_4 대칭성이 깨짐을 알 수 있다.^[14] 그림 3(c), (d)는 철 화합물 $\text{Ca}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ 의 topographic image와 current map이다. 도메인의 경계선이 topographic image에서는 잘 보이지 않지만 current map에서는 보인다. 또한 autocorrelation을 통해 이 도메인 경계선을 기준으로 서로 다른 방향성이 있음을 알 수 있다(그림 3(d) inset 참조). 이는 ferropnictide 계열에서 존재함이 알려진 nematicity라고 불리는 전자 구조적 특성이며 STM을 통해 최초로 발견된 여러 전자구조 특성들의 좋은 예라 하겠다.^[15]

Momentum Information via SI-STM

일반적으로 STM을 사용하면 준입자들의 k 공간 정보를 수집할 수 없다. 이유는 다음과 같다. 흔히 Bloch state는 고정된 k 값에 따른 위상 정보($\psi(r) \propto e^{ik \cdot r}$)를 지니고 있다. 만약 불순물이 없는 이상적인 물질을 STM으로 측정할 경우, LDOS는 $\sum_k |\psi_k(r)|^2 \delta(E - E_k)$ 에 비례하므로, LDOS는 공간적으로 균일하고 운동량 정보는 사라진다. 하지만 불순물, 결정 구조의 결함, 그리고 경계선들에 의한 산란이 일어나면 상황은 달라진다. 전자나 준입자가 탄성 산란을 하면 에너지는 동일하지만 운동량이 다른 Bloch states가 발생한다. 간단히 운동량이 다른 두 Bloch states가 있다고 가정하자. $\psi(r) \sim e^{ik_1 \cdot r} + e^{ik_2 \cdot r}$ 이므로 $|\psi(r)|^2 \sim 1 + \cos[(\vec{k}_1 - \vec{k}_2) \cdot \vec{r}]$ 가 된다.

REFERENCES

- [10] S. H. Pan *et al.*, Nature **403**, 746 (2000).
- [11] E. W. Hudson *et al.*, Nature **411**, 920 (2001).
- [12] K. McElroy *et al.*, Science **309**, 1048 (2005).
- [13] Jinho Lee *et al.*, Nature **442**, 546 (2006).
- [14] Y. Kohsaka *et al.*, Nature **454**, 1072 (2008).
- [15] T. -M. Chuang *et al.*, Science **327**, 181 (2010).

Fig. 4. (a) and (c). The expected quasiparticle interference wave-vectors and electronic band of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ and $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$. (b) and (d). Fourier transform of differential conductance map at 8 meV and -9 meV.^[9]

따라서 SI-STM을 통해 LDOS를 측정할 경우, 산란이 일어나는 부근에서 삼각함수꼴의 곡선 모양을 가진 간섭(Interference) 패턴을 확인할 수 있다. 따라서 $\text{LDOS}(\propto |\psi(r)|^2)$ 를 푸리에 변환하면 $\vec{q} = \vec{k}_1 - \vec{k}_2$ 의 정보를 획득할 수 있다. 만약 특정한 운동량을 지닌 Bloch state들이 산란에 지배적이면, 이에 해당하는 명확한 $\vec{q}$ 값이 간섭에 의해 나타난다. 그림 4(a), (c)는 초전도 상태의 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ 와 비초전도체인 $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ 에서 LDA 계산 혹은 tight-binding법으로 계산된 밴드구조로부터 예상되는 큰 DOS 값을 갖는 특정한 $\vec{q}$ (Quasiparticle Interference)들을 보여준다. 그림 4(b), (d)는 실제 $\text{LDOS}\{g(\vec{r}, E)\}$ 를 푸리에 변환하여 획득한 $g(\vec{q}, E)$ 이다.^[9]

SJTM and Cooper Pair Density

STM은 전통적으로 들뜬 입자(일반적으로 준입자: quasiparticle)를 측정하며 초전도체의 경우 쿠퍼쌍의 붕괴에 의한 Bogoliubov 준입자에 대하여 스펙트럼을 측정함을 뜻한다. 여기서 준입자란 Fermi Liquid 이론에서 나오는 용어로서, 여러 자유도들, 예컨대 격자, 전자, 스핀 등의 자유도들의 상호작용을 무시할 수 없는 경우에도 그 상호작용을 포함한 전자들의 성질을 마치 자유전자처럼 기술할 수 있고, 이때 이들 상호작용이 포함된 들뜬 상태의 전자들을 일컫는 용어이다. SI-STM

이 초전도 전자쌍, 혹은 쿠퍼쌍(Cooper Pair)들을 직접 측정하지 못하는 이유는 Fermi Level에 존재하는 이들 쿠퍼쌍들은 비초전도체인 금속 STM 탐침으로의 터널링이 불가능하기 때문이다. 따라서 쿠퍼쌍의 측정을 위해서는 탐침 자체도 초전도 상태여야만 Josephson 터널링, 혹은 쿠퍼쌍 터널링이 일어날 수 있다. 많은 그룹들이 Josephson 효과를 이용하여 초전도현상의 order parameter인 쿠퍼쌍 밀도를 STM을 이용하여 직접 측정하기 위한 노력들을 하였다. 많은 기술적 문제로 인해 진전이 없던 중 최근 Scanning Josephson Tunneling Microscopy (SJTM) 기술을 사용하여 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ 에서 직접적으로 쿠퍼쌍 밀도 함수를 측정하였다. SJTM의 원리는 다음과 같다. 쿠퍼쌍을 들뜨게 하여 준입자를 측정한다면, Fermi level에 존재하는 쿠퍼쌍을 측정할 수 없다. 하지만 두 초전도체 사이에 있는 약한 연결체를 통해 전자쌍이 통과하는 조셉슨 터널링 현상을 이용한다면 직접적으로 쿠퍼쌍을 발견할 수 있다. 만약 SI-STM의 tip을 초전도로 만들어 준다면, 초전도-절연체-초전도(SIS) 접합을 구현할 수 있다. 여기에 전압에 따른 조셉슨 터널링 전류를 측정하여 임계전류 I_c 혹은 $V_B=0$ 근처에서의 기울기를 구하면 쿠퍼쌍 밀도에 비례하게 된다. 이와 같은 SJTM 기술을 구현하기 위해서는 여러 어려움들을 극복하여야 한다. 우선 팁이 오염되지 않아야 하므로, 팁을 측정이 이루어지고 진공 및 극저온의 용기 내에서 만든다. 그리고 조셉슨 터널링이 발생할 만큼 초전도 사이에 약한 연결체를 만들어야 하는데, 이를 위해서는 팁과 샘플이 원자 수준으로 가까워야 한다. 하지만 온도가 내려갈수록 조셉슨 터널링이 일어나기 위한 팁과 샘플 사이의 거리가 커지는 점을 이용하여, 희석냉동기로 온도를 수십 mK로 낮추어 약한 연결체를 실현하였다. 이와 더불어 위의 두 조건을 만족하면서 spectroscopic image를 획득하기 위해서는, 팁의 위치를 수만 번 바꾸어 가며 측정을 해야만 한다. 따라서 안정적인 환경을 위해 다양한 노이즈를 차단하여야 하는데 이들 문제는 방음실, RF 차단실, 고성능 진동 차단시설을 이용하여 노이즈 문제를 해결하였다. 그림 5는 SJTM의 모식도와 실제 얻은 결과이다.^[16] 그림 5(b)에서 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ 의 전자쌍 밀도파(pair density wave, PDW)를 국소적으로 나타내었는데, Zn 불순물 근처(검은 지점)에서 PDW가 억제되는 것을 알 수 있다. 덧붙인 그림은 PDW map을 푸리에 변환한 것으로, PDW가 0이 아닌 특정한 q 를 가지는 pattern을 이루는 것을 명확히 보여준다. 이 PDW가 Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov(FFLO) 상과 관련 있는지 많은 관심을 받고 있는 상황이며 앞으로의 추이가 기대된다.

REFERENCES

- [16] Sang Hyun Joo *et al.*, Nature 532, 343 (2016).

Fig. 5. (a) Schematic diagram of SJTM. A nanometer flake is attached to tungsten tip. (inset) Circuit diagram of SJTM. (b) Maximum current, $I_c(r)$, image in $76\text{ nm} \times 76\text{ nm}$ field of view. Dark spots are Zn atoms. Near impurities, Cooper pair condensation is suppressed. (inset) Fourier transform of $I_c(r)$. Value of bright peak in dotted red circle is $Q_F = (0.25, 0)2\pi/a_0$ and $(0, 0.25)2\pi/a_0$.^[16]

Future of SI-STM and HTSC: Spin Degrees of Freedom?

STM을 이용한 고온 초전도체 연구는 현재 활발히 진행되고 있다. Dopant의 효과, 전하 밀도파와 nematicity, 그리고 운동량 공간에서 전자(혹은 준입자)의 간섭 등이 발견되어 고온초전도 연구에 많은 기여를 하고 있으며, 최근에는 STM을 사용하여 쿠퍼쌍 밀도 함수를 직접적으로 측정하여 map의 형태로 나타내었다. 이처럼 STM은 원자 수준의 해상도에서 전자, 포논, 오비탈 등의 다양한 자유도의 map을 만들 수 있다. 하지만 아직 spin 자유도를 측정하여 map을 만든 경우는 없다(그림 6). 비록 다양한 장비에서 spin 자유도의 측정이 시도되고 있으나^[17-19] 원자 해상도를 유지하면서 여러 spin들이 밀집되어 있는 계에서의 각 원자별 spin들의 magnetization을 직접 국소적으로 측정하는 경우는 아직 보고된 바가 없는 것이다. 고온 초전도체의 특징 중 하나는 여러 상들이 존재한다는 것이다. 예컨대, 구리 계열의 고온 초전도체의 경우 antiferromagnetic insulator, pseudo gap phase, superconductivity, strange metal, and Fermi liquid 등의 상이 존재하며 또한 charge density wave, pair density wave, spin density wave 등의 여러 density wave들의 존재가 보고되고 있다. 이를 통해 알 수 있듯이, 고온 초전도체는 전자 자유도, 격자 자유도, spin 자유도들이 서로 얽혀 상호작용을 하고 있는 복잡한 물질이다. 만약 STM을 사용하여 원자 수준의 해상도에서 spin의 자유도를 측정할 수 있다면, 독특한 자기적 상을 지니고 있는 고온 초전도체의 국소적인 spin에 대한 정보를 획득, 실공간 상의 spin 열개, 나아가서는 운동량 공간에서의 열개까지도 알 수 있는 가능성이 있다. STM을 이용하여 측정할 수 있는 다른 다양한 자유도(degrees of freedom)들을 spin 자유도와 동시에 측정한다면, 이들 자유도들 간의 측정된 상호작용을

Fig. 6. Various degrees of freedom (DOF) measurable in atomic scale using STM. A probe capable of detecting a local spin magnetization in a correlated electron system is yet to be realized.

원자 단위로 시각화할 수 있을 것이다. 이를 통해 다른 자유도와 의 상호작용을 직접적으로 확인하여 고온 초전도체에서 일어나는 여러 현상들의 원인, 나아가서는 그토록 높은 온도에서의 초전도 현상이라는 난제를 밝혀낼 수 있을 것이 기대된다. 새로운 spin의 원자단위 측정이 가능한 Microscopy 개발이 시급하다.

맺음말

1986년 고온 초전도체가 발견된 이후로 수많은 연구가 진행되었지만, 쿠퍼쌍의 작용원리를 명확히 규명하지 못하고 있다. 초전도 현상과 터널링의 역사에서 볼 수 있듯이 터널링 나아가서 STM은 초전도 및 고온 초전도체 현상 연구와 매우 긴밀한 관계에 있어 왔다. 특히 SI-STM의 개발을 통해 연구자들은 전에 볼 수 없었던 많은 자유도들을 real space뿐만 아니라 k-space까지도 탐구할 수 있게 되었으며 또한 최근 초전도 현상의 핵심이라고 할 수 있는 고온 초전도 쿠퍼쌍의 공간 분포를 SJTM을 통해서 측정하는데 성공하였다. SJTM은 이제 막 시작되었고, 앞으로 다양한 고온 초전도체들에의 응용이 예상된다. 앞으로 서로 다른 고온 초전도체에서의 쿠퍼쌍들의 공간 분포에 대한 data를 통해 이들 간의 개연성 혹은 차이점을 보다 확실하게 볼 수 있을 것이며, 이는 고온 초전도 현상의 근본적인 메커니즘을 밝혀내는데 실마리가 될 수 있을 것이다. 또한 STM을 이용한 고온초전도체 연구의 새로운 가능성 중의 하나는 과연 STM으로 강상관 물질상의 spin 자유도까지도 원자 해상도로 관측할 수 있을까 하는 것이다. 필자는 가능할 것으로 본다.

REFERENCES

- [17] M. Azuma *et al.*, Phys. Rev. Lett. **73**, 3463 (1994).
- [18] J. M. Tranquada *et al.*, Nature **375**, 561 (1995).
- [19] D. C. Johnston *et al.*, Physica C **153**, 572 (1988).