

温度可変強磁場走査トンネル顕微鏡の開発と超伝導体への適用 Development of Variable-Temperature Scanning Tunneling Microscope in High-Fields and Application to Superconducting Materials

東北大・金研 西寄照和, 小林典男
T. Nishizaki and N. Kobayashi
Institute for Materials Research, Tohoku University

1. はじめに

走査トンネル顕微鏡(STM)は、原子分解能を持った精度で探針を試料表面に対して走査することで、試料表面の原子構造を観測できるだけでなく、低温、磁場中でナノスケール電子分光を行うことが可能である。超伝導体をはじめとして電子物性が磁場中で変化する物質では強磁場中において走査トンネル分光(STS)を行うことは電子状態を理解する上で重要な知見を与える。特に、磁場中の超伝導体にSTM/STSを活用すれば、超伝導体に侵入した渦糸の配列や渦糸内の準粒子励起状態、更には渦糸と欠陥との相互作用(渦糸ピン止め機構)などの直接観測が可能になり、超伝導の基礎から応用にわたる広い研究領域で活用可能なユニークな実験手段である。

我々は、これまでに、金属材料研究所の強磁場超伝導材料研究センターに設置されている強磁場マグネットで使用可能なSTMシステムを開発してきた。その結果、ハイブリッドマグネット[30T-HM (27T-HM)], 18T 冷凍機冷却超伝導マグネット(18T-CSM), 18T 超伝導マグネット(18T-SM)などでSTM実験を可能にした[1-5]。平成23年度は、これまでに開発を行った強磁場STM装置を超伝導体のナノスケール電子状態の測定へ適用する予定であった。しかし、東日本大震災の影響により使用予定の30T-HMと18T-CSMは年間を通して使用不可能となったため、平成23年度はこれまでに開発したSTMを4.2K以上の温度で測定できるように改良を行い、また、新たに15T超伝導マグネット(15T-SM)で使用できるSTMの開発を行った。

2. STMの改良と実験

30T-HMと18T-CSMのように室温ボアを有するマグネットの場合には、これまでに独自に開発してきた非磁性除振台を用いてSTM測定が可能である。しかし、前年度の報告書で述べたように[5]、強磁場超伝導材料研究センターの超伝導マグネットには除振機構が備わっていない(または、マシンタイム時のみの取り付けは難しい)ため、平成23年度に行った15T-SM中のSTM測定では除振台を用いずに実験を行う必要があった。本研究では機械的な振動の影響を出来る限り抑制するために、共振周波数が高いSTMユニットを用いた[5]。

15T-SMは可変温度インサート(VTI)を備えており、一般の測定では比較的容易に温度制御を行うことができるが、STM測定で原子分解能を求める場合に

は安定した温度制御が求められる。これまでは、磁場中における安定度を優先しSTMユニットの材料としてチタンを用いてきたが、本研究では4.2K以上で温度制御を行うためSTMユニットの一部を銅製の部品で置き換えた(図1)。

STM/STSを行う超伝導試料として臨界温度 $T_c \sim 7.3\text{K}$ の NbSe_2 単結晶を用いた。 NbSe_2 単結晶の表面は劈開により清浄表面を準備し探針としてPtIrを用いた。

3. 温度可変STMによる測定結果

15T-SM中で使用可能な温度可変STMのSTMユニットの配置図を図1に示す。図に示すように、VTIを用いてSTMインサート周辺の温度制御を行い、更に、断熱真空槽内に配置した銅製のSTMボディーのヒーターを用いてSTMユニット全体の温度制御を行った。その結果、 $T = 5\text{K}$ から 100K の温度領域で $\Delta T = 10\text{mK}$ 以下の安定度で温度制御が可能になった。

NbSe_2 単結晶を用いた $T = 5\text{K}$ におけるトンネル分光の結果を図2に示す。トンネル分光実験では探針と試料間のトンネル条件(図2の場合: $I = 0.2\text{nA}$, $V = -0.11\text{V}$)をセットした後、フィードバックを一時的に切り離し、その間にバイアス電圧を掃引することで

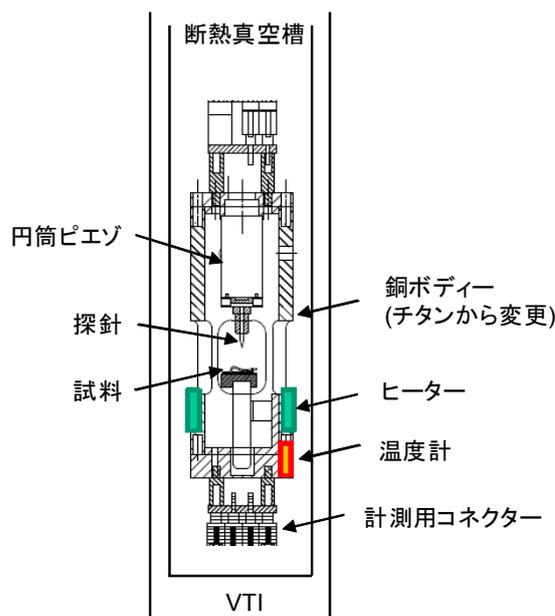


Fig. 1 Schematic illustration of the STM unit for high-field and low-temperature measurements.

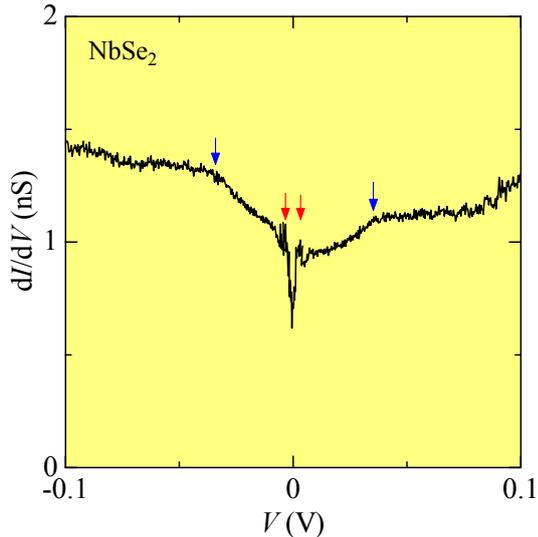


Fig. 2 Tunneling spectrum measured at $T = 5$ K. STM/STS conditions: $I = 0.2$ nA, $V = -0.11$ V

トンネルスペクトルを測定する。測定中には原子レベルでの機械的安定度とともに温度の安定度も要求される。図2の測定結果では、低バイアス側 $\Delta \sim 1.6$ meV 付近(図中の赤矢印)に超伝導ギャップが観測され、ギャップ以下のフェルミエネルギー付近で局所状態密度の低下が見られた。また、36 meV 付近に観測されたショルダー構造(図中の青矢印)は NbSe₂ の CDW 転移温度以下に存在する CDW ギャップ構造に対応している。これらの結果は NbSe₂ で予測されるトンネルスペクトルの特徴を反映しており、本研究で開発した 15T-SM 用の温度可変 STM はフィードバックを一時的に切り離した状態においても高い安定度を持つことを示している。

図3には $T = 20$ K, $H = 15$ T における NbSe₂ の STM 像を示す。STM 像には約 3.5 Å 間隔の原子配列が観測され、NbSe₂ の結晶構造から予測される配列と一致していることが分かる。また、STM スキャン中に像の歪みなどのドリフトは観測されなかった。このことは磁場中で温度制御を行っている STM ボディーだけでなく、試料や探針部分も熱的に安定していることを示している。

4. まとめ

平成23年度は当初の予定を変更して 15T-SM で使用可能な温度可変 STM の開発を行った。また、開発した STM を用いて NbSe₂ 単結晶の低温、磁場中における STM 測定を行い、温度制御状態におけるトンネルスペクトルと STM 像から温度可変 STM の安定性を評価した。その結果、一時的にフィードバックが切り離された状態においても、トンネルスペクトルが安定的に測定可能であることが分かった。また、磁場中において STM 原子像が観測され、数分程度の STM スキャン中においても原子レベルでドリフトの影響が見られないことが分かった。

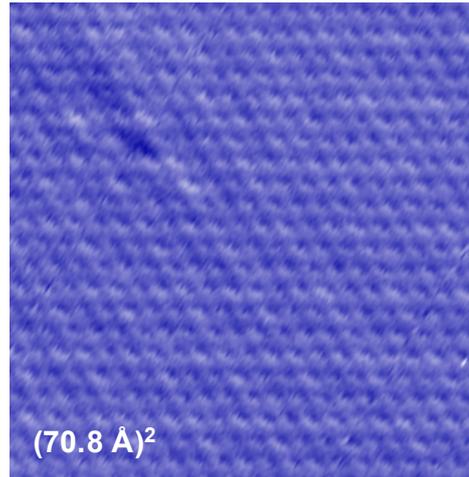


Fig. 3 STM images of NbSe₂ measured in 15T-SM ($T = 20$ K, $H = 15$ T). $I = 0.05$ nA, $V = -10$ mV.

本研究では、30T-HM と 18T-CSM が使用不可能であったため、除振台が使用できない 15T-SM 用に温度可変 STM を開発し、原子分解能を持った高安定 STM を開発した。今後、15T-SM, 18T-SM のデュワーに除振台が設置されれば更に安定した STM/STS 測定が可能になると考えられる。15T-SM と 18T-SM への除振機構の導入は他の共同利用実験の低ノイズ化においても有効であると考えられるため、このような実験環境の実現を期待したい。

謝辞

強磁場 STM の開発にあたり、様々なご支援をいただきました強磁場超伝導材料研究センターの渡辺和雄教授、淡路智准教授に感謝いたします。また本研究は公益財団法人住友電工グループ社会貢献基金 2010 年度学術・研究助成(2011 年度まで延期)の援助を受けて行われました。ここに感謝いたします。

参考文献

- [1] 西寄照和, 小林典男: 東北大学金属材料研究所強磁場超伝導材料研究センター平成 20 年度年次報告, p. 187.
- [2] T. Nishizaki and N. Kobayashi, J. Phys.: Conf. Series 150 (2009) 012031.
- [3] 西寄照和, 小林典男, 日本物理学会 2007 春 (19aPS-130), 日本物理学会 2010 春 (20pPSA-52)
- [4] 西寄照和, 小林典男: 東北大学金属材料研究所強磁場超伝導材料研究センター平成 21 年度年次報告, p. 177.
- [5] 西寄照和, 淡路智, 小林典男: 東北大学金属材料研究所強磁場超伝導材料研究センター平成 22 年度年次報告, p. 172.