

研究終了報告書

「ノイズの画像化によるトポロジカル材料の電子ダイナミクスの解明」

研究期間:2020年10月～2024年3月

研究者: 翁 銭春

1. 研究のねらい

現実的なトポロジカル材料・デバイスには、さまざまな散乱および散逸チャンネルが存在する。しかし、その基礎的な散乱・散逸のダイナミクスは、有効な実験方法がないため、直接解明することは困難である。本研究のねらいは、走査雑音顕微鏡(Scanning Noise Microscope, SNoiM)と呼ばれる新しい顕微鏡を開発して、既存手法では不可能であった、トポロジカル材料の表面でナノスケール電荷輸送とエネルギー散逸を直接可視化し、局所的な散乱・散逸のメカニズムを解明する。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究の主要な成果は、通電トポロジカルデバイスにおける局所的なエネルギー散逸を直接可視化する新しい測定技術(低温で動作する走査雑音顕微鏡, Cryo-SNoiM)の創出。具体的には:

1. 低温・室温両用走査雑音顕微鏡の開発

新しい設計により、室温および約100Kの低温環境の両方で動作可能な走査雑音顕微鏡が開発した。現在、この低温走査雑音顕微鏡の商業化を推進するために日本の企業と共同で取り組んでいる。これにより、本研究成果の実用化と幅広い応用が期待される。

2. 新型超高感度テラヘルツ(THz)検出器の開発

走査雑音顕微鏡には、自作した超高感度THz検出器が搭載されている。本研究で、新しいフォトゲーティングメカニズムを開発して次世代の超低暗電流、超高感度、高速応答のTHz検出器の研究も行われ、顕微鏡の性能向上寄与する。

3. トポロジカル材料・電子デバイスの研究への応用

開発された低温走査雑音顕微鏡は、通電トポロジカル材料やデバイスにおける局所エネルギー散逸を観察するために利用され、特に二次元電子デバイスの研究において初期の成果を上げている。

(2) 詳細

研究テーマ A「低温・室温両用走査雑音顕微鏡の開発」

低温原子間力顕微鏡(AFM)を構築して、新しい低温 SNoiM(図1)を開発した(ユニソク株式会社と共同出願:特願2023-184928)。THz検出器(CSIP)と光学系(ピンホールとGeリレーレンズ)は、液体ヘリウムを消費せずに5Kで機械的に冷却された。既存の300K装置と比較してSNoiMの感度を劇的に向上できるように、走査型プローブシステム、試料ステージ、および対物レンズは真空中に置かれ、110Kに冷却された。これにより、背景放射が大幅に抑制され、

AFM の安定性を向上した。低温装置には、自作した超高感度テラヘルツ検出器(検出波長: 17.5 μm , 約 17.1THz)を用いた。

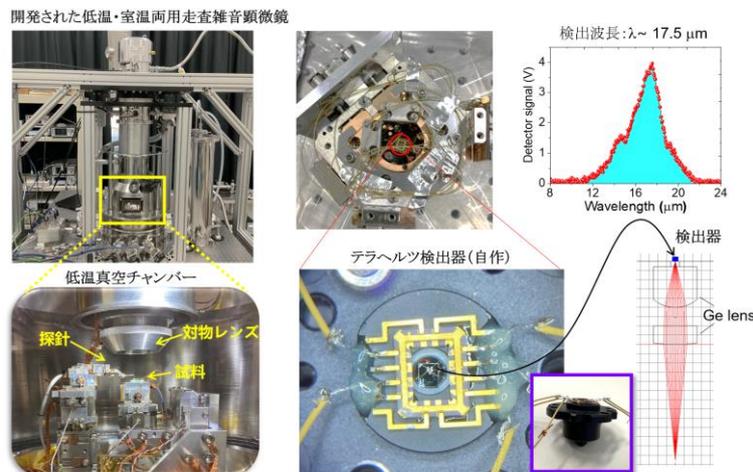


図1. 自作 THz 検出器用いて低温・室温両用走査雑音顕微鏡を開発した。

研究テーマB「超高感度微小テラヘルツ検出器の開発」

走査雑音顕微鏡(SNoiM)の心臓部分として超高感度テラヘルツ検出器の開発重要である。現在使っている検出器は電界効果に基づくCSIP 検出器である(感光サイズ: $75 \times 75 \mu\text{m}^2$)。本研究で、もっと高い感度をもつ微小 THz検出器(感光サイズ: $< 1 \mu\text{m}^2$)を開発した(特願 2022-035889)。作製した微小検出器で、通常的光検出メカニズム(例えば、トンネル効果(tunneling effect)または電界効果(field effect))と異なる新しい検出方法を開発した。このメカニズム(フォトゲーティング, photo-gating)により、検出器の暗電流(dark current)を大幅に抑制し、非常に高い THz オンオフ比(on-off ratio)を実現した(現在使っている検出器の on-off ratio は約 1.2, 新しい検出器の on-off ratio は1000以上になる)。次世代の超低暗電流、超高感度、高速応答の THz 検出器の研究も行われ、顕微鏡の性能向上寄与する。開発した検出器は他の領域も使えるかもしれない。

研究テーマC「低温でナノ熱測定のための基盤技術の確立」

室温でナノ熱測定技術はいくつがあります、低温で世界的にも Weizmann Institute of Science の Zeldov グループが開発した SOT(SQUID-on-tip)という技術しかない。本研究で開発した低温 SNoiM には、試料表面のエバネセント波を検出していて、低温で電子温度分布を直接可視化することができた(図2;通電デバイスにおける超解像電子温度分布を直接可視化した)。低温でナノ熱測定のための基盤技術の確立した。

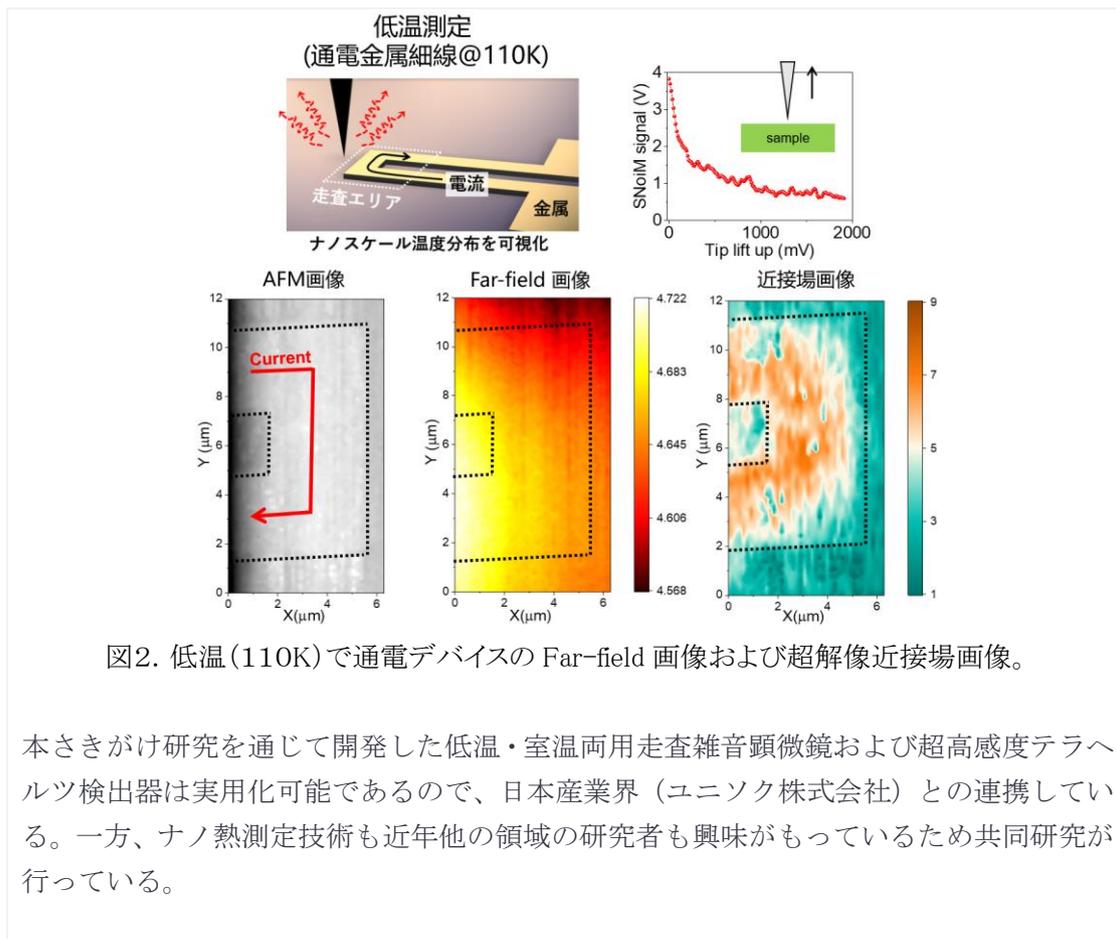


図2. 低温(110K)で通電デバイスのFar-field 画像および超解像近接場画像。

本さがけ研究を通じて開発した低温・室温両用走査雑音顕微鏡および超高感度テラヘルツ検出器は実用化可能であるので、日本産業界（ユニソク株式会社）との連携している。一方、ナノ熱測定技術も近年他の領域の研究者も興味をもっているため共同研究が行っている。

3. 今後の展開

次のステップ、本研究で開発した低温走査雑音顕微鏡を用いて、異なる温度領域でのトポロジカル半金属表面を測定して、新しいエネルギー散逸メカニズムを明らかにする。同時に、本研究で開発した超低暗電流を持つ THz 検出器の顕微鏡への適用をされに検証し、顕微鏡のパフォーマンスを一層向上させる。

4. 自己評価

本さがけ研究には3つの目標がある。まず、さまざまな物質の熱物性を研究するために独創的なナノ熱測定技術を開発することが最初の目標である。この目標は低温 SNOiM の開発に成功し、ほぼ100%の達成度になる。この「走査雑音顕微鏡」は、日本の企業(走査プローブ顕微鏡専門会社ユニソク株式会社)との連携して、世界初の製品を目指している。2つ目の目標は、SNOiM の感度を劇的に向上できるように、次世代の超高感度テラヘルツ検出器を開発することである。こも目標も 95%の達成度を持っている。残された仕事は SNOiM 顕微鏡への適用を検証することである。最後は、開発された SNOiM 用いてトポロジカル物質に応用することである。しかし、この目標の達成度は30%しかない。その理由は、プロジェクト全体の進行に非常にの努力しましたが、全く新しい低温走査雑音顕微鏡の開発は先行事例がなかったため、装置の開発期間が予想を超えてしまい、最近まで低温顕微鏡を動作することだできた。今後、本研究

で開発された測定技術お活用し、トポロジカル物質の研究に新たな視点をもたらすことを期待している。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 2件

1. **Qianchun Weng**, Weijie Deng, Susumu Komiyama, Toru Sasaki, Hiroshi Imada, Wei Lu, Iwao Hosako, Yousoo Kim, *Review of Scientific Instruments*, 2024 (accepted).

概要: ナノスケールの熱画像化および温度検出は、多様な科学技術分野において基本的に重要である。ほとんどのナノスケール温度計測技術は格子やフォノンの温度を調べることに焦点を当てており、「ホットエレクトロン」と呼ばれる非平衡電子には感度がない。テラヘルツ走査ノイズ顕微鏡(SNoiM)は、ホットエレクトロンの熱画像化において強力であることが示されているが、これまでの研究は室温に限定されていた。本研究では、低温での定量的なホットエレクトロン温度検出に特化した低温走査ノイズ顕微鏡(Cryo-SNoiM)の開発を報告する。この顕微鏡は特別な二室設計を特徴とし、真空チャンバーに収容された高感度テラヘルツ検出器がパルス管クライオクーラーを使用して約 5K に効率的に冷却されている。別のチャンバーでは、原子間力顕微鏡とサンプルが周囲の真空条件で室温に維持されるか、液体窒素によって約 110K まで冷却される。この独自の二室冷却システム設計は、低温での SNoiM 測定の有効性を高める。これにより、冷却前に室温でのチップの事前選択が可能になるだけでなく、調整可能なパラメーターに依存せずに局所的な電子温度の定量的導出も可能になる。Cryo-SNoiM の性能は、冷却された自己加熱された狭い金属線におけるホットエレクトロンの分布の画像化を通じて実証されている。この機器の革新は、低温でのホットエレクトロンの動態および非平衡輸送現象をさまざまな材料システムで画像化するための大きな可能性を秘めている。

2. Kuan-Ting Lin, **Qianchun Weng**, Sunmi Kim, Susumu Komiyama, Yusuke Kajihara, *Rev. Sci. Instrum.* 94, 023701 (2023).

概要: パッシブ散乱型走査近接場光学顕微鏡(s-SNOM)は、外部照射を必要とせず、局所化された長波長赤外線(LWIR)表面波を研究するために使用されている。ここでは、4 K の液体ヘリウム冷却を備えた真空チャンバー内での低温のパッシブ s-SNOM 装置を開発した。チャンバー内の極めて低温環境が、低背景輻射での近接場検出の実現を可能にすることである。この技術は主に高感度の LWIR 共焦点光学系とチューニングフォークベースの原子力顕微鏡を利用しており、波長 $10.2 \pm 0.9 \mu\text{m}$ で近接場検出が行われた。本研究では、低温 s-SNOM の詳細な実装について説明し、5 K の温度で SiO₂ 上に堆積した自己加熱 NiCr ワイヤの熱励起表面電磁場の調査を報告する。表面電磁場の起源は、伝導電子の熱励起するゆらぐ電荷であることが確立された。

(2) 特許出願

研究期間全出願件数: 2 件(特許公開前のものは件数にのみ含む)

1	発 明 者	翁 銭春、小宮山 進、今田 裕、金 有洸
---	-------	----------------------

	発 明 の 名 称	光検出器及び光検出方法
	出 願 人	国立研究開発法人理化学研究所
	出 願 日	2022年3月9日
	出 願 番 号	特願 2022-035889
	概 要	本発明は高い信号対雑音比を有する光検出器に関する。電荷敏感赤外光トランジスタ(CSIP)を利用した赤外線検出器、すなわち、赤外線を金属薄膜から成る光結合機構で受光すると、当該機構により垂直方向の振動電場が誘導され、その下方の周囲から孤立した2次元電子層(浮遊ゲート)に形成される量子井戸内の電子が励起し、トンネリングし、さらに下方の伝導チャンネルに移動して浮遊ゲートが正に帯電し、それにより増加する伝導チャンネル(ソース・ドレイン間)の電気伝導度を検出することで赤外線を検出する検出器が知られている。しかしながら、赤外線の入力に伴わない電流、すなわち暗電流が発生することがあり、これを抑えて信号対雑音比(SN比)を改善することが望まれる。
2	発 明 者	翁 銭春、小宮山 進、佐々木 徹、今田 裕、金 有洙
	発 明 の 名 称	走査雑音顕微鏡
	出 願 人	国立研究開発法人理化学研究所、株式会社ユニソク
	出 願 日	2023年10月27日
	出 願 番 号	特願 2023-184928
概 要	本発明は、走査雑音顕微鏡(Scanning Noise Microscopy; SNoiM)に関し、特に、低温と室温の両方で使用可能な走査雑音顕微鏡に関する。外部光源を使用することなく、試料自身が生じる放出光をナノスケールで検出するために、超高感度テラヘルツ検出器(自作)を用いるパッシブ型近接場顕微鏡による計測方法が実現されている。このようなパッシブ型近接場顕微鏡を使用すれば、例えば、試料自身の分子運動や光子振動から放出される赤外線とマイクロ波との間の領域の光または電磁波であるテラヘルツ波(波長10 μ m～1mm)を直接計測することができ、細胞内の生体反応の様子、金ナノ粒子触媒反応の様子等を観察可能となる。	

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

主要な学会発表(招待講演のみ):

1. Qianchun Weng, “Nanoscopy of charge fluctuations in matter -Scanning Noise Microscope (SNoiM)-”, Nanospec 2021, Japan, March 10, 2021.
2. Qianchun Weng, “IR/THz scanning near-field microscopy without external illumination”, The 12th International Conference on Information Optics and Photonics (CIOP), China, July 23, 2021.
3. Qianchun Weng, “Nanoscale thermal imaging of dissipation in nonequilibrium systems”, 3rd IBS Conference on Surface Atomic Wires and 2nd IBS-RIKEN STM Workshop, Korea, August 22, 2023.
4. Qianchun Weng, “Direct visualization of hot carrier transport with a scanning noise microscope”, 3rd Asia-Pacific Conference on Plasma and Terahertz Science, Korea, August 25, 2023.

5. Qianchun Weng, “Progress on passive infrared near-field super-resolution temperature imaging”, 2nd International Conference on Earth & Space: from Infrared to Terahertz 2023, China, September 23, 2023.
6. Qianchun Weng, “Terahertz quantum sensing and ultrasensitive super-resolution imaging”, The International Conference on Quantum Photonics, China, November 24, 2023.

受賞(2件):

1. 翁 銭春, エヌエフ基金研究開発奨励賞, 研究課題: ナノデバイスの電子温度分布を可視化する走査雑音顕微鏡の開発, 一般財団法人エヌエフ基金, 2020年12月2日。
2. 翁 銭春, 花王科学奨励賞, 研究課題: 温度のナノ計測による量子マテリアルのエネルギー輸送・散逸の解明, 公益財団法人花王芸術・科学財団, 2022年6月2日。