

令和 2 年 6 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2018～2019

課題番号：18K19013

研究課題名(和文) 走査トンネル顕微鏡を用いた圧縮センシングによるマグノン分散関係計測

研究課題名(英文) Magnon dispersion measurement using compressive sensing for scanning tunneling microscopy

研究代表者

長谷川 幸雄 (HASEGAWA, YUKIO)

東京大学・物性研究所・教授

研究者番号：80252493

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,800,000円

研究成果の概要(和文)：走査トンネル顕微鏡による準粒子干渉計測に圧縮センシングの手法を導入して測定効率を高め、測定精度を保ちつつ測定時間を短縮させた上で、所望とする電子状態のエネルギー分散関係を計測できることを実証した。また、スピン偏極走査トンネル顕微鏡による非弾性トンネル分光信号のイメージングから、マグノンの定在波の観測およびその波数のエネルギー分散関係を計測することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁性体の物性評価において重要な知見であるマグノンのエネルギー分散関係の測定には、主として、中性子による非弾性散乱が用いられるが、薄膜・ナノ構造に対しては信号強度が不足し不可能である。そうした状況において、STMによる非弾性トンネル分光により磁性薄膜・ナノ構造体での測定が可能となれば、その磁気相互作用やダイナミクスに関する知見が得られることとなり学術的意義は高い。加えて、圧縮センシングによる計測を準粒子干渉計測に対して実現できた点も、物性研究への展開の端緒となるものとして意義深い。

研究成果の概要(英文)：By utilizing a compressive sensing technique for quasiparticle interference measurements of scanning tunneling microscopy in order to improve the measurement efficiency and thus shortening the measurement time while maintaining the measurement accuracy, we successfully obtained the energy-dispersion relationship of the surface electronic state. From the imaging of the inelastic tunneling signal by spin-polarized scanning tunneling microscopy, we have successfully observed standing waves of magnons and measured the energy-dispersion relationship of their wavenumbers.

研究分野：表面科学・ナノサイエンス

キーワード：走査トンネル顕微鏡 スピン偏極走査トンネル顕微鏡 圧縮センシング マグノン 非弾性トンネル分光

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

走査トンネル顕微鏡 (STM) を用い、欠陥近傍に誘起される表面電子状態の定在波すなわち準粒子干渉 (quasi-particle interference: QPI) 像を解析することによって、電子状態の波数・フェルミ面やエネルギー分散関係が得られることは良く知られている。非占有状態や磁場下での測定も可能なことから、超伝導体や強相関物質などの物性評価に応用されている。しかしながら、この方法は試料表面上の各点でのトンネルスペクトル測定が必要であり、十分な精度での測定を行うには長時間を要することが課題であった。

一方、STM では、非弾性トンネル分光による励起エネルギー測定も可能であり、分子振動やスピン励起、フォノン・マグノンといった準粒子の励起エネルギーの測定が報告されている。しかしながら、微弱な信号強度や測定時間の制約のために、QPI のようにその強度分布をイメージングすることは難しく、したがって波数の測定やエネルギー分散関係を求めることは困難であった。

本研究では、このような STM 計測における課題を克服することは、STM による更なるナノ物性計測推進に不可欠と考え、以下に挙げる研究を行うこととした。

2. 研究の目的

本研究では、上記の QPI 計測に圧縮センシングの考え方を導入して測定効率を高め、測定精度を保ちつつ測定時間短縮を実現することを目的とした。また、STM による非弾性トンネル分光信号のイメージングからフォノンやマグノン等の励起プロセスにおける波数およびエネルギー分散関係を計測することを目的とした。更には、圧縮センシングを非弾性トンネル分光イメージングにも取り込むことによって、短時間での高精度計測の実現を目指した。

3. 研究の方法

マグノンの波数は、非弾性トンネル分光による励起スペクトルの強度分布のフーリエ変換から求めることが出来る。マグノンの波数は離散値であることから、フーリエ変換したデータはスパース (疎) と言える。以前、我々は、同じようにスパース性の高い電子状態の準粒子干渉 (QPI) 計測において、スパースモデリングの代表的な手法である LASSO 法を用いて、電子状態の波数 (正確には散乱ベクトル) を効率良く短時間で計測できることを実証した。ただその際にはあらかじめ全点で得られたデータを元に、仮想的に間引いたデータに対して圧縮センシングの手法を適用することで、間引いたデータでも十分な精度で電子状態の波数が計測できることを導き出した。本研究では、実際の計測においてランダムに間引いた測定を行うことで、本手法により測定時間が短縮できることを検証する。

マグノン分散計測を行う系としては、これまで当研究室においてスピン偏極 STM による観察を行ってきた Mn/W(110) 磁性薄膜がモデルサンプルとして適切と考えている。同基板上的 Mn の持つスピンは、[001] 方向には強磁性、[1-10] 方向には反強磁性の相互作用を有しており、かつ基板のスピン軌道相互作用に由来するジャロシンスキー・守谷相互作用によりスピンの向きが周期的に変調するらせん構造を示すことが知られている。本研究では、非弾性トンネル信号の強度分布を効率良く測定することによって励起信号のイメージングを実現し、その波数からマグノン励起プロセスのエネルギー分散関係を実測している。

4. 研究成果

(1) 圧力センシングによる表面電子状態分散関係の測定

走査トンネル顕微鏡 (STM) による準粒子干渉 (QPI) 測定は、STM を用いて電子状態のエネルギー分散関係が得られる手法として知られている。同様の情報が得られる角度分解光電子分光法に比べ、ナノスケールでの局所測定が可能、低温化が比較的容易、磁場中での測定が可能、フェルミ準位よりエネルギーの高い非占有準位の測定が可能、といったメリットがあり、超伝導体などの系に対してこれまで優位な成果を挙げてきている。しかしながら、測定時間がかかりすぎるなどの問題点があり、昨今の液体ヘリウム高騰も相俟って、その汎用化を妨げていた。

一方、データ科学の観点からは、QPI 測定により得られる電子状態のエネルギー分散図を見ると数本の線が走るのみであり、基本的に疎ら (スパース) である。そこで、この QPI 計測においてスパースモデリングの考え方を導入し、圧縮センシングの方法により、QPI 測定時間の短縮化が実現できれば、その意義は極めて大きい。

これまで、単一のエネルギーにおける QPI パターンから同エネルギーでの電子状態の波数を、圧縮センシングにより間引いたデータからでも全データから導き出される結果と同程度の精度を保てることを示してきた。本研究では、これをエネルギー分散関係の計測に展開し、単一エネルギーの場合と同様に間引いたデータでも十分な精度での結果が

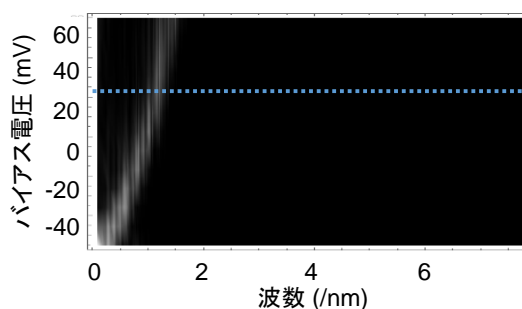


図1 Ag(111)表面でのQPI計測により求めた同表面での電子状態のエネルギー分散関係。通常測定の1/9のデータ量から圧縮センシングにより得ている。

得られることを実証した。さらには、ランダムに間引いた測定点での計測を行い、QPI 計測の測定時間が実際に短縮できることも検証している。

図 1 は、Ag(111) 表面での QPI 計測により求めた同表面での電子状態のエネルギー分散関係を示している。通常の測定データからランダムに約 1/9 のデータを抽出し、圧縮センシングの代表的な手法である LASSO 法により各エネルギーでの波数を算出し、表示したものである。自由電子ライクな放物線形状の分散関係が得られており、そこから電子状態の結合エネルギーや有効質量を求めることができています。また計測の段階で測定する点を 1/9 になるようにランダムに選択して得られたデータからも、LASSO を用いることで同様のエネルギー分散関係を得ることができた。これらのことは、QPI 測定において、圧縮センシングの手法を導入することによって、測定するデータ点数を減らす、すなわち測定時間を減らしても十分な精度でのエネルギー分散計測が可能であることを実証している。

(2) スピン偏極走査トンネル顕微鏡を用いた非弾性トンネル分光信号イメージングによるマグノン分散測定

先に述べた QPI 法では、電子状態のエネルギー分散関係を求めることができる。一方、STM には非弾性トンネル分光によりフォノンやマグノンなどの励起スペクトルを得ることができる。そこで、本研究では両者を組み合わせて、非弾性トンネル分光におけるピーク強度の空間分布からフォノンやマグノン等の励起子のエネルギー分散関係を得ようとする。

系としては、二次元的な磁性層である W 基板上に形成した Mn₂ 原子層を選び、スピン偏極 (SP-) STM によるマグノン励起およびその定在波観察をターゲットとしている。この系に関しては、我々の研究室において既に研究実績があり、試料作製方法や基本的物性値が知られていることが選択の理由である。

図 1 に、Mn₂ 原子層/W 基板上で測定された SP-STM 像と、同表面のサイト 1、2 で測定された非弾性トンネル分光スペクトルを示している。同表面での SP-STM 像には、コニカルらせん磁性に起因するストライプ状のコントラストが現れており、明 (暗) 領域はそれぞれ探針磁化方向に平行 (反平行) な磁化成分を持つ領域である。対応する非弾性スペクトルを見ると、特徴的なピークおよびディップ構造が現れているが、その強度が平行・反平行で差があることから、この非弾性信号がスピン由来であることが推察される。実際、外部磁場を制御することで探針磁化方向を反転させると、スペクトルも入れ替わることが確認されている。

スピン由来の励起プロセスとしてはマグノンがあることから、ここで観測されたピークもマグノン励起によるものと予測される。そこで励起強度の空間分布を測定することによりその定在波観測を試みた。図 3 には、Mn の 3 原子層領域との境界近傍 ((a) の STM 像参照) で得られた非弾性信号強度のマッピングを示している ((b)-(d))。設定したバイアス電圧 (~エネルギー値) は図中に記載されている。

これらの非弾性マッピングを見ると、コニカルらせん構造によるストライプ (図 3 では横方向) に加えて、[1-10] 方向 (縦方向) に走る振動構造が見えている。これは、3 原子層領域との境界近傍においてマグノンの散乱による定在波が形成され、その振幅に応じて励起強度が変化することによるものとして説明される。さらに異なるエネルギーでの定在波を見るとその波長は変化しており ((e))、マグノンのエネルギー分散を反映している。得られた分散関係は、わずかに 3 点ではあるが、マグノンの散乱における選択則を考慮することによって説明されている。

本研究では、スピン偏極 STM を用いた非弾性トンネル分光の信号強度のマッピングから、マグノンの定在波およびその分散関係が測定されることを示しており、今後の新しい STM による計測技術として注目を集めるであろう。

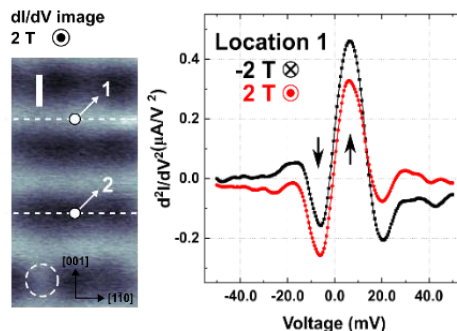


図 2 Mn₂ 原子層/W 基板の SP-STM 像 (左) と非弾性トンネル分光スペクトル (右)

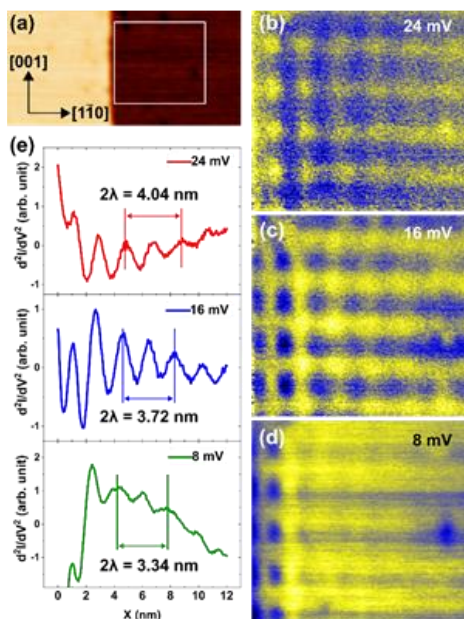


図 3 非弾性信号のマッピングによるマグノン定在波の観測

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hasegawa Yukio, Haze Masahiro, Yoshida Yasuo	4. 巻 1
2. 論文標題 Nanoscale Magnetic Imaging	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Reference Module in Materials Science and Materials Engineering	6. 最初と最後の頁 53~66
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.10437-0	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nakamura T., Kim H., Ichinokura S., Takayama A., Zotov A. V., Saranin A. A., Hasegawa Y., Hasegawa S.	4. 巻 98
2. 論文標題 Unconventional superconductivity in the single-atom-layer alloy Si(111)- 3× 3-(TI,Pb)	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 134505 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） DOI: 10.1103/PhysRevB.98.134505	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 長谷川幸雄	4. 巻 53
2. 論文標題 走査プローブ顕微鏡による物性研究	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 固体物理	6. 最初と最後の頁 575-585
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Haze Masahiro, Yang Hung-Hsiang, Asakawa Kanta, Watanabe Nobuyuki, Yamamoto Ryosuke, Yoshida Yasuo, Hasegawa Yukio	4. 巻 90
2. 論文標題 Bulk ferromagnetic tips for spin-polarized scanning tunneling microscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 013704 1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） doi.org/10.1063/1.5063759	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hamada Masayuki、Hasegawa Yukio	4. 巻 99
2. 論文標題 Role of one-dimensional defects in the electrical transport through Si(111)-7×7 surface states	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 125402 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.1103/PhysRevB.99.125402	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Yukio Hasegawa
2. 発表標題 Real-space Observation of Surface-assisted Orbital Order by Scanning Tunneling Microscopy
3. 学会等名 International Conference on Multi-Condensate Superconductivity and Superfluidity in Solids and Ultra-cold Gases (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yukio Hasegawa
2. 発表標題 Gap-dependent imaging in scanning tunneling microscopy
3. 学会等名 The 2018 International Conference on Nanoscience + Technology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yukio Hasegawa, Yasuo Yoshida, and Howon Kim
2. 発表標題 Real-space observation of surface orbital order by STM
3. 学会等名 International Workshop: New Developments in STM on Surfaces of Functional Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yukio Hasegawa, Yasuo Yoshida, and Howon Kim
2. 発表標題 Real-space observation of surface orbital order by scanning tunneling microscopy
3. 学会等名 The 3rd Asia-Pacific Symposium on Solid Surfaces & Cross-Strait Symposium on Solid Surfaces (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Yoshida, H. Kim, C.-C. Lee, T.-R. Chang, H.-T. Jeng, H. Lin, Y. Haga, Z. Fisk and Y. Hasegawa
2. 発表標題 Surface-induced orbital ordering in a strongly-correlated superconductor revealed by gap-dependent scanning tunneling microscopy
3. 学会等名 14th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考