

平成 30 年 6 月 5 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K17730

研究課題名(和文) スピン・バレー結合した遷移金属ダイカルコゲナイドにおける実空間バレー状態の解明

研究課題名(英文) Real-space investigation of valley state of spin-valley coupled transition metal dichalcogenides

研究代表者

町田 理 (Machida, Tadashi)

国立研究開発法人理化学研究所・創発物性科学研究センター・特別研究員

研究者番号：60570695

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、スピン・バレー結合した遷移金属ダイカルコゲナイドにおいて走査型トンネル分光を行い、不純物周辺の電子状態イメージングからバレー内及びバレー間散乱のスピン・及び軌道自由度の役割を詳細に調べた。その結果バレー間散乱がバレー内散乱に比べ極端に抑制されていることを明らかにした。また、電子散乱におけるスピン選択則と軌道選択則を考慮したシミュレーションも行い、軌道選択則もバレー間散乱抑制に重要な役割を演じるとともに、軌道自由度とバレー自由度の結合性も実験的に始めて実証した。これらの結果は今後、遷移金属ダイカルコゲナイドをバレートロンクス材料として応用する際に重要な知見であると考えられる。

研究成果の概要(英文)：We have performed Scanning tunneling microscopy and spectroscopy experiments on spin-valley coupled transition metal dichalcogenides, to investigate the role of not only spin but also orbital degrees of freedom (DOF) on the intra- and inter-valley scattering process. Our experimental results reveal that the signals of the inter-valley scattering are noticeably weaker than those of the intra-valley scattering. To understand the role of spin and orbital DOF on QPI, we performed theoretical simulations with only the spin selection rules and with the selection rules of both DOF. A comparison with the theoretical simulations indicate the necessity of the orbital selection rules to reproduce the observed suppression of inter-valley signals. These findings will provide important information in future application for valleytronics.

研究分野：semiconductor

キーワード：バレートロンクス スピントロンクス 遷移金属ダイカルコゲナイド 走査型トンネル顕微鏡

1. 研究開始当初の背景

二次元蜂の巣格子系における電子はバレー自由度と呼ばれる新たな内部自由度を有する。二次元蜂の巣格子系では波数空間におけるブリュアンゾーン端の+K 及び-K 点に二種類の非等価なバンド端(バレー)が存在し、この二種類のバレーはスピン自由度における up 状態と down 状態に対応し、スピン自由度と類似した性質を持つ。1970 年代からこのバレー自由度を情報記録や伝達媒体として利用したバレートロンクスが提案されてきたが、これを実現させるには、二種類のバレーを偏極させる方法の確立が必要不可欠であり、当該分野の課題となっている。

空間反転対称性が破れ、強いスピン軌道相互作用を有する単層もしくは 3R-積層の遷移金属ダイカルコゲナイドは、近年バレー自由度制御という観点から非常に注目を集めている。その理由は、当該物質が有する特異なバンド構造にある。この物質はグラフェンに類似した二次元ハチの巣格子を有し、その電子状態は波数空間において+K 点と-K 点にバレーを有する。さらに空間反転対称性の破れと強いスピン軌道相互作用に起因し、スピン状態が+K と-K バレーで互いに逆向きな、スピン・バレー結合性で特徴づけられる(図1)。このスピン・バレー結合性によりスピンもしくはスピン磁気モーメントを介してバレー自由度の制御、検出の可能性が提案されてきた。実際、幾つかの物質において、スピン・バレーホール効果、円偏光バレー選択励起、スピン・バレー

ゼーマン効果等が実験的に観察されている。

他方、最近の理論によると、スピンだけでなく、軌道自由度もバレーと結合している可能性が示唆されている。バレー・スピン・軌道の状態が波数空間上でどのような状態にあるかは学術的に非常に興味深いだけでなく、軌道・バレー結合性はバレー自由度制御の幅を広げるといふ、応用上の重要性も秘めている。しかしながら現在までに当該物質における軌道状態およびそれがバレー内及びバレー間散乱過程にどのような影響を及ぼすか明らかになっておらず、当該分野の問題の一つでもある。

2. 研究の目的

本研究では、空間反転対称性が破れた遷移金属ダイカルコゲナイドの不純物周辺の電子状態を実空間で捉え、電子散乱過程を明らかにすることで、軌道状態と軌道自由度によるバレー間、バレー内散乱過程へ影響を明らかにすることを目的としている。

3. 研究の方法

本研究では、走査型トンネル顕微鏡を用いて不純物周辺における電子散乱過程を実空間で可視化する。また研究対象試料として、バルクで空間反転対称性が破れている 3R-NbS₂ を使用している。得られた結果と軌道・スピン自由度を考慮した準粒子干渉パターンシミュレーション結果を比較し、スピンだけでなく軌道自由度の電子散乱への影響を明らかにする。

4. 研究成果

本研究では、STM を用いた電子状態分光イメージングにより、スピン・バレー結合したバレー電子の電子定在波の観察に成功した(図2)。実空間像では複数の散乱チャンネルによるシグナルが存在するため非常に複雑な空間構造をしている。他方、このフーリエ変換像にはバレー内散乱のシグナル(図2(b)の水色の半円弧)とバレー間散乱シグナル(図2(b)の赤点線)がはっきりと分離できている。またこれらのエネルギー分散をみると、バレー間散乱強度がバレー内散乱強度に比べ極端に抑制されていることも明らかとなった(図2(c)(d))。この抑制原因を詳細に調べるために、スピン選択則と軌道選択則を考慮した電子定在波のシミュレーションを行った。実験結果とシミュレーションの比較からスピン選択則のみでは実験で得られたバレー間散乱の抑制は説明できず、スピンと軌道の両選択則を考慮することで実験結果をより忠実に再現できることを明らかとした。この実験結果は、理論で予想されている軌道状態を始めて可視化したものであり、バレー自由度はスピンだけでなく軌道自由度とも強

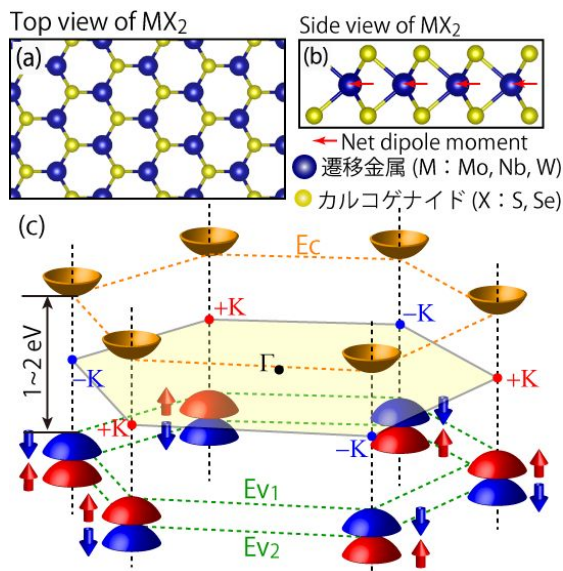
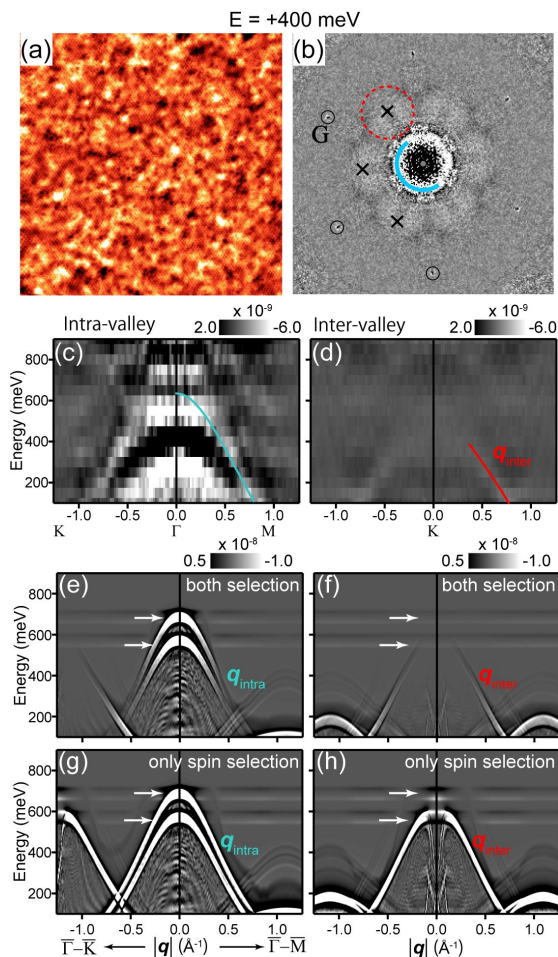


図1. 遷移金属ダイカルコゲナイドの結晶構造(a),(b)とスピン・バレー結合したバンド構造(c).

く結びついていることを示している。さらに、他の実験で報告されているバレー間散乱の抑制原因や長いバレー緩和時間の要因の一つとして、バレー電子の散乱過程における軌道選択則が重要な役割を演じていることを示唆している。これは、今後遷移金属ダイカルコゲナイドをバレートロニクスに応用する上で重要な知見となる。



5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

図 2. (a)3R-NbS₂ の E=+400meV における電子状態像. (b)(a)のフーリエ変換像.(c)バレー内散乱と(d)バレー間散乱のエネルギー分散. (e)(f) スピンと軌道の選択則を入れたシミュレーション. それぞれ(c),(d)に対応. (g),(h)スピン選択則のみのシミュレーション.

〔雑誌論文〕(計 5 件)

[1] Appearance of a Domain Structure and Its Electronic states in Iron Doped 1T-TaS₂ Observed by Scanning Tunneling Microscopy and Spectroscopy
Y. Fujisawa, T. Shimabukuro, H. Kojima, K. Kobayashi, T. Machida, S. Demura, and H.

Sakata

Journal of Physical Society of Japan 86, 113703 (2017)

査読あり

[2] Full-gap superconductivity in spin-polarized surface states of topological semimetal β -PdBi₂

K. Iwaya, Y. Kohsaka, K. Okawa, T. Machida, M. S. Bahramy, T. Hanaguri, and T. Sasagawa
Nature Communications 8, 976 (2017)

査読あり

[3] Orbital-dependent quasiparticle scattering interference in 3R-NbS₂

T. Machida, Y. Kohsaka, K. Iwaya, R. Arita, T. Hanaguri, R. Suzuki, M. Ochi, and Y. Iwasa
Phys. Rev. B 96, 075206 (2017)

査読あり

[4] Spin-orbit scattering visualized in quasiparticle interference

Y. Kohsaka, T. Machida, K. Iwaya, M. Kanou, T. Hanaguri, T. Sasagawa
Phys. Rev. B 95, 115307 (2017)

査読あり

[5] Bipartite electronic superstructures in the vortex core of Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+ δ}

T. Machida, Y. Kohsaka, K. Matsuoka, K. Iwaya, T. Hanaguri, T. Tamegai
Nature Communications 7, 11747 (2016)

査読あり

〔学会発表〕(計 7 件)

[1] 黒リンにおけるバルク不純物状態の STM 観察

町田理, 高橋敬成, 花栗哲郎, 幸坂祐生, 岩谷克也, 笹川崇男, 永井佑紀
日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月 21 日-24 日, 岩手, 岩手大学(上田キャンパス)

[2] Orbital-dependent quasiparticle interference in 3R-NbS₂

T. Machida, Y. Kohsaka, R. Suzuki, M. Ochi, K. Iwaya, R. Arita, T. Hanaguri, and Y. Iwasa
CEMS Topical Meeting on Emergent 2D Materials July 20 - 21, 2017, Saitama, Japan, RIKEN [Invited]

[3] Effect of magnetic field on electronic superstructures in cuprate superconductors

T. Machida, Y. Kohsaka, K. Iwaya, T. Hanaguri, T. Tamegai

16th International Workshop on Vortex Matter in Superconductors (Vortex2017), May 28- June 3, 2017, Natal, Brazil, (International Institute of Physics) [Invited]

[4] 黒リンにおける準粒子干渉
町田理, 高橋敬成, 花栗哲郎, 幸坂祐生, 岩谷克也, 笹川崇男
日本物理学会 第 72 回年次大会, 2017 年 3 月 17 日-21 日, 大阪, 大阪大学(豊中キャンパス)

[5] Bipartite electronic superstructures in the vortex core of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$
T. Machida, Y. Kohsaka, K. Matsuoka, K. Iwaya, T. Hanaguri, T. Tamegai
CEMS-QPEC Symposium on Emergent Quantum Materials, January 16-17, 2017, Tokyo, Japan, The Univ. of Tokyo. [Invited]

[6] 17.5T-強磁場極低温走査型トンネル顕微鏡の開発と評価
町田理, 花栗哲郎, 幸坂祐生, 岩谷克也, 松岡賢佑, 為ヶ井強, 高橋敬成, 笹川崇男
日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年 9 月 21 日-24 日, 金沢, 金沢大学(角間キャンパス)

[7] Bipartite electronic superstructures in the vortex core of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$
T. Machida, Y. Kohsaka, K. Matsuoka, K. Iwaya, T. Hanaguri, T. Tamegai
Spectroscopies of novel superconductors 2016 (SNS2016), June 19-24, 2016, Stuttgart, Germany

6. 研究組織

(1) 研究代表者

町田 理 (Tadashi Machida)
国立研究開発法人 理化学研究所・創発物性科学研究センター・特別研究員
研究者番号: 60570695