

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25600095

研究課題名(和文)ラッシュバ効果によりスピンの偏極した表面電子系の磁性原子によるスピンフリップ散乱

研究課題名(英文) Spin-flip scattering of Rashba-induced spin-split surface band electrons by magnetic atoms

研究代表者

平山 博之 (Hirayama, Hiroyuki)

東京工業大学・総合理工学研究科(研究院)・教授

研究者番号：60271582

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)：ラッシュバ効果によりスピン分裂した表面電子バンドを持つBi/Ag(111) 3×3 表面上にCo原子蒸着を行った。この時で出来たCo島には界面格子整合に伴う周期構造が現われ、またCoのdバンドに起因する電子状態密度のピーク位置は、Co島膜厚の変化に伴う格子緩和により、Fermi準位側へとシフトすることが明らかになった。

またBi/Ag(111) 3×3 表面に代わる、Co原子吸着に対し安定で、かつラッシュバ効果による大きなスピン分裂を示す表面電子バンドを持った系の候補として、Si(111) 3×3 -Ag表面とBi原子の新たな表面合金層、及びBi(110)超薄膜に関する研究を行った。

研究成果の概要(英文)：We studied the growth, structure and electronic structure of Co atom adsorbed Bi/Ag(111) 3×3 surface system. Co atoms nucleated atomically flat, triangular islands with an interface-induced Moire pattern. The d-band of the Co islands were found to shift to the Fermi level systematically with the increase in the Co island thickness.

We also studied a new surface alloy phase of Bi atoms and Si(111) 3×3 -Ag surface, and ultra-thin Bi(110) islands as candidates of the alternative system with a large spin-split surface band by the Rashba effect and robust against Co atom adsorption.

研究分野：表面界面物性

キーワード：表面 電子散乱 スピン ラッシュバ効果

1. 研究開始当初の背景:

近年、ラシュバ効果によりスピン分極した表面や、トポロジカル絶縁体表面など、固体表面上のカイラルにスピン偏極した2次元電子系が注目されている。カイラルにスピン偏極した2次元電子系では、xy表面上を+y方向に向かって走る電子状態 $|+k_y, \uparrow\rangle$ のスピンは、-y方向に向かって走る電子状態 $|-k_y, \downarrow\rangle$ のスピンと互いに反対向きに偏極している。従ってカイラルにスピン偏極した2次元電子系のエッジでは、スピンフリップを伴わない非磁性原子による後方散乱は禁止されるため、スピントロニクス応用の面で注目を浴びている。しかし局在スピンを持つ磁性原子では、スピンフリップを伴う散乱過程も許容される。このため基礎・応用の両面で、「スピン偏極した表面電子系の磁性原子によるスピンフリップ散乱」はホットなトピックスとなっている。ただし磁性原子での散乱におけるスピンフリップを伴う散乱チャンネルへの散乱が起こる割合や、この過程に対する磁性原子の局在スピン方向の影響は、実験的に明らかにされていない。

2. 研究の目的:

以上に述べた観点から、「カイラルにスピン偏極した2次元電子系の磁性不純物原子による散乱過程」を明らかにすることは重要な研究課題である。しかし実験的に、(1)磁性不純物によってスピンフリップを伴う散乱チャンネルが開かれる様子やその散乱チャンネルへの散乱確率を個々の原子に対して観測する方法や、(2)スピンフリップ散乱に対する磁性不純物原子の局在スピン方向の効果を明らかにした報告はなされていない。本研究の目的は、ラシュバ効果によりカイラルにスピン偏極した Bi/Ag(111) 3x 3 表面上に Co 磁性原子を導入し、水素原子吸着により Co 原子の局在スピン方向を面直および面内に制御した系において Co 原子周辺の散乱に伴う表面電子の量子干渉パターンを走査トンネル顕微鏡(STM)によって観察し、(1),(2)の問題を原子レベルで実験的に明らかにしようとするものである。

3. 研究の方法:

本研究計画の概要は以下の通りである。

- (1) 既存の超高真空 STM 装置内 Bi/Ag(111) 3x 3 表面を作成する。この上に、液体ヘリウム温度で Co 原子を 0.01 ML 以下程度蒸着し、個々の Co 原子が Bi/Ag(111) 3x 3 表面で十分孤立した系を作成する。
- (2) この系に対し、STM 装置を用いた dI/dV 像測定を行い、Bi/Ag(111) 3x 3 表面の p_x - p_y 軌道に起因するラシュバ-

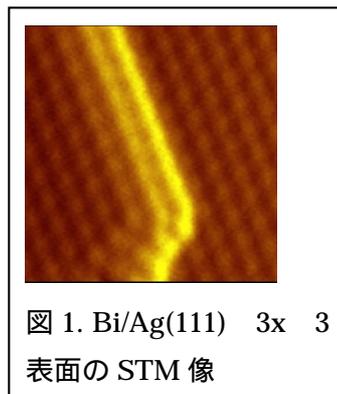
スピン分裂した非占有状態の表面バンド電子が、非磁性の表面ステップや孤立 Ag 原子、および(1)で導入した孤立 Co 磁性原子に入射した際に散乱波と干渉することによって発生する電子定在波(量子干渉パターン)を観測する。

(3) 孤立 Co 磁性原子と孤立 Ag 非磁性原子周囲の電子定在波振幅を、それぞれ Bi/Ag(111) 3x 3 表面ステップ散乱における電子定在波の振幅に対して規格化する。規格化した振幅を比較することで、非磁性 Ag 原子に対して孤立磁性 Co 原子周りの定在波振幅がスピンフリップ散乱によって減少する割合 $|R_{\downarrow}|^2$ を定量的に評価する。

(4) (3)で求めた孤立 Co 原子の局在スピンの面直方向を向いている状態での散乱振幅を、水素吸着によって局在スピンを面内に向かせた Co 原子での散乱振幅と比較し、スピン偏極した2次元電子系のスピンフリップを伴う散乱確率 R_{\downarrow} と磁性原子の局在スピン方向との相関を実験で定量的に明らかにする。

4. 研究成果:

Si(111) 基盤上に 20 ML 程度の膜厚の Ag(111) 超薄膜を 2 段階エピタキシャル成長法 (electronic growth) で作成し、この上に



1/3 ML の Bi 原子を蒸着することによって、ラシュバ効果によりスピン分裂した表面電子バンドを持つ Bi/Ag(111) 3x 3 表面を作成した(図 1)。

作成した表面の原子配列を STM、またその電子状態密度とエネルギー分散関係を STS, dI/dV イメージングにより観察し、所望の表面電子状態を持つ Bi/Ag(111) 3x 3 表面が実現されていることを確認した。

これに引き続き、Co ワイヤーを通電加熱することにより Co 原子を蒸着する Co 蒸着源を作成し、Ag(111) 超薄膜表面上に Co 原子の蒸着を行った。一定の電流によって過熱した Co 蒸着源から、Ag(111) 超薄膜表面上に Co 原子を蒸着する時間を徐々に増やし、それぞれの蒸着量で表面の STM 観察を行うことにより、表面の Co 島被覆率を測定し、Co 原子の蒸着速度を評価した。

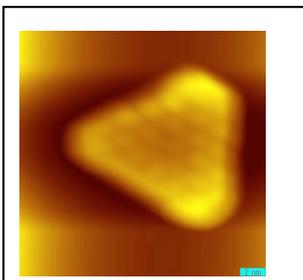


図 2. Co 島の STM 像

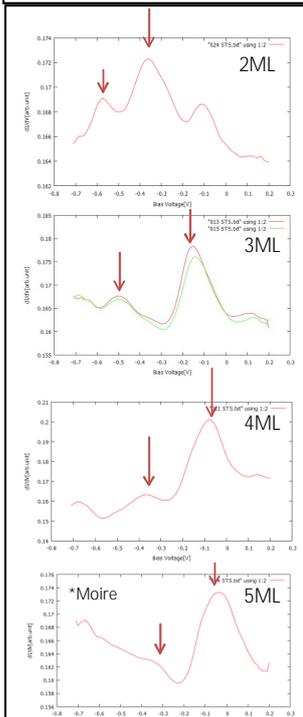


図 3. Co 島の STS スペクトル変化

3x 3表面上にCo原子が表面スピン分裂バンドの電子に対するスピンフリップを引き起こす孤立散乱体として働かせるべく、作成したCo原子蒸着源を用いてこの表面にCo原子が孤立した形で吸着している状態の作成を試みた。しかし、蒸着速度や基板温度などの成長条件を広い範囲で様々に振ったにも拘らず、Bi/Ag(111) 3x 3表面上にCo原子が孤立して吸着する状況は実現されなかった。

これはおそらくBi/Ag(111) 3x 3表面画Co原子吸着に対して不安定であり、孤立原子吸着よりはむしろクラスター形成が優先して発生してしまうためと考えられる。このため、Bi/Ag(111) 3x 3表面に代わる、Co原子吸着に対して安定かつ、その表面電子バンドがラッシュバ効果によって大きくスピン分裂している表面として、Si(111) 3x 3-Ag表面上にBi原子を吸着させた系、およびBi(110)表面系に関する探索を行った。

Si(111) 3x 3-Ag表面には、表面に局在した2次元時油田氏的な表面電子バンドが存在する。ただしこの表面電子バンドは実効的

この時、Ag(111)超薄膜表面上に形成されたCo島には、下地のAg(111)格子とCo島の格子の整合性による周期的なパターンが現われることがSTM像の

観察により見出された(図2)。また、膜厚にともなうCo島の格子歪の変化により、STSスペクトル中に現われるCo島のd電子状態に起因した電子状態密度のピーク位置が、Co島膜厚とともにFermi準位方向にシフトしていく傾向が見出された。(図3)

以上の成果を踏まえ、表面電子バンドがラッシュバ効果によりスピン分裂したBi/Ag(111)

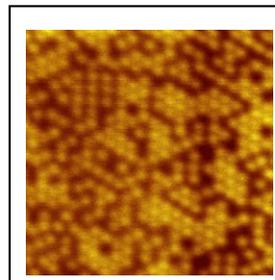


図 4. Bi-Si(111) 3x 3-Ag 混晶表面の STM 像

ことで、Bi/Ag(111) 3x 3表面に代わる、Co原子吸着に対し安定でかつ大きなスピン分裂を持つ表面電子バンドを持つ系の実現を試みた。実験の結果、基板温度400付近でSi(111) 3x 3-Ag表面上にBi原子を蒸着させた場合に、これまで知られていなかったAg原子配列中にBi原子が3x 3、および2x 3の2種類のローカルオーダーを持って配列した表面が現われることを発見した(図4)。ただし、本研究期間内では、この表面電子バンドの分散や、その上のCo原子吸着およびそのラッシュバ分裂した表面バンド電子のスピンフリップ散乱への影響にまではまだ研究の手をのばすことが出来ず、今後に残された課題となっている。

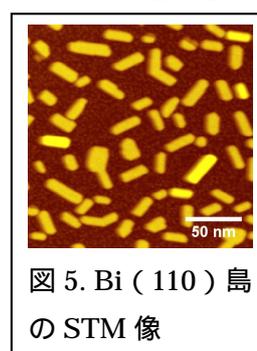


図 5. Bi(110)島の STM 像

さらにCo原子吸着に対し安定で、スピン分裂した表面電子バンドを持つ系の候補として、Si(111) 3x 3-B表面上に成長させたBi(110)超薄膜に関する実験的な検討も行った。これについては研究の結果、基板の3格子とBi(110)格子がそれぞれ対角線方向にcommensurateすることによって、2種類の3重回転軸方向に沿って伸びる細長い形状のBi(110)超薄膜が発生することが明らかになった(図5)。またこれらの異なる方向に伸びた島が合体したドメイン境界における原子配列の接続や配置を、詳細なSTM観測に基づき明らかにした。ただしこの表面のバンド分散関係に関しては、期間内にまだ十分なデータを取るまでには至っておらず、これも今後の課題となっている。

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)

[雑誌論文](計 2件)

1) I.Kokubo, Y.Yoshiike, K.Nakatsuji,

にスピン縮退している。このため、本研究ではその縮退を解いて、表面に大きなスピン分裂を導入すべく、この表面に大きなスピン軌道相互作用を持つBi原子を導入し、表面上のBiとAg原子の表面合金相を形成させる

さらにCo原子吸着に対し安定で、スピン分裂した表面電子バンドを持つ系の候補として、Si(111) 3x 3-B表面上に成長させたBi(110)超薄膜に関する実験的な検討も行った。これについては研究の結果、基板の3

H.Hirayama,
“ Ultra-thin Bi(110) films on Si(111)
3x 3-B substrates,
Physical Review B91, pp.075429(1)-(5),
2015 (査読有)
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.91.075429>
2) H.Fukumoto, M.Miyazaki, Y.Aoki,
K.Nakatsuiji, H.Hirayama,
“ Initial stage of Ag growth on Bi/Ag(111)
3x 3 surfaces ”,
Surface Science 611, pp.49-53(2013).
(査読有) [doi:10.1016/j.susc.2013.01.013](https://doi.org/10.1016/j.susc.2013.01.013)

[学会発表](計 7件)

- 1) 小久保郁也、吉池雄作、青木悠樹、中辻寛、平山博之、
“ Si(111) 3x 3-B 表面への Bi 超薄膜の成長と構造 ”
日本物理学会秋季大会 2014年9月7~10日、中部大学
- 2) I.Kokubo, Y.Yoshiike, Y.Aoki, K.Nakatsuji, H.Hirayama,
“ A STM study of Bi(110) ultra-thin films grown on Si(111) 3x 3-B surfaces ”,
The 7th International Symposium on Surface Science (ISSS-7), Nov.02-06, 2014, Matsue, Japan
- 3) 小久保郁也、吉池雄作、中辻寛、平山博之、
“ Si(111) 3x 3-B 表面への Bi 超薄膜の成長と構造 (2) ”
日本物理学会春季大会 2015年3月21~24日、早稲田大学
- 4) Y.Yoshiike, H.Fukumoto, A.Aoki, K.Nakatsuji, H.Hirayama,
“Ripple structure of Ag(111) ultra-thin films on Si(111)7x7 substrates”,
12th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-12) Nov.04-08, 2013, Tsukuba, Japan
- 5) 吉池雄作、福本博之、青木悠樹、中辻寛、平山博之、
“ Si(111)7x7 基板上 Ag 超薄膜表面のリップル構造 ”
日本物理学会秋季大会 2013年9月25~28日、徳島大学
- 6) 中辻寛、青木悠樹、福本博之、平山博之、
“ Ag 超薄膜と Si(111)基板との界面における水素吸着 ”
日本物理学会秋季大会 2013年9月25~28日、徳島大学
- 7) H.Hirayama,
“ Quantum interference of the Rashba-induced spin-split two-dimensional surface state electrons ”
Collaborative Conference on Materials

Research, June 23-28, 2013, Jeju, Korea

[図書](計 0件)

[産業財産権]
出願状況(計 0件)
取得状況(計 0件)

[その他]
ホームページ:
<http://www.materia.titech.ac.jp/~hirayama/2009hirayamalabHP/>

6. 研究組織

(1)研究代表者:
平山 博之 (HIRAYAMA HIROYUKI)
東京工業大学・大学院総合理工学研究科・教授
研究者番号: 60271582