

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360019

研究課題名（和文） スピン分裂した表面バンド電子の量子干渉とその表面スピフィルターへの応用

研究課題名（英文） Quasi-particle interference in a spin-split surface band and its application to spin filters

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

研究成果の概要（和文）：

Bi/Ag(111) $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ 表面の電子状態を走査トンネル顕微鏡 (STM) を用いた dI/dV 像および走査トンネル分光法 (STS) により調べた。この結果 STS スペクトルにおけるピーク構造の解析からこの表面電子バンドはスピン分裂していることが確認された。またそのスピン分裂した表面バンド電子は、ステップでの散乱においては同じスピン分極を持ったバンド内遷移を引き起こすことによって準粒子干渉が可能となり、dI/dV 像中に電子定在波パターンが現れること、またその波長のエネルギー依存性から、2 本のスピン分裂したバンドを平均した分散関係が得られることが明らかになった。さらに、この表面における電子の寿命や、Ag 成長における Bi 原子のサーファクタント効果、Bi 原子被覆率が高い場合に現れる新規な表面構造についても新たな知見が得られた。

研究成果の概要（英文）：

We investigated electronic states of the Bi/Ag(111) $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ surfaces using STM-based dI/dV imaging and STS spectrum measurements. The surface states were confirmed to be spin-split by observing a characteristic peak in STS. The spin-split surface band electrons were suffered intra-band scattering at surface steps to induced quasi-particle interference (i.e. surface electron standing wave pattern in dI/dV images). The energy dependence of the wavelength of the interference pattern enabled us to deduce the averaged surface band dispersion of the paired spin-split surface bands. In addition, we found a novel surface reconstruction of Bi/Ag(111) surface at a higher Bi coverage, surfactant effect of Bi on the Ag growth on the Bi/Ag(111) $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ surfaces, and a relation between the randomly adsorbed Bi atoms and the life time of the surface state electrons.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|------------|-----------|------------|
| 2010年度 | 7,000,000 | 2,100,000 | 9,100,000 |
| 2011年度 | 2,800,000 | 840,000 | 3,640,000 |
| 2012年度 | 2,800,000 | 840,000 | 3,640,000 |
| 年度 | | | 0 |
| 年度 | | | 0 |
| 総計 | 12,600,000 | 3,780,000 | 16,380,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・薄膜・表面界面物性

キーワード：表面

1. 研究開始当初の背景

Ag(111)表面上に1/3原子層(ML)のBi原子を供給すると、Bi原子は $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ 周期でAg表面原子と置換した吸着構造を示す。この表面は角度分解光電子分光の実験において、表面バンドが分裂していることが発見され、また第一原理計算からこれは表面ラッシュバ効果によって表面バンドのスピン縮退が解けた状態にあることが明らかにされ、近年にわかに注目を集めるようになった。しかし理論計算ではフェルミ準位あるs-, spz-軌道由来の表面バンドに加え、フェルミ準位上にもpx-, py-軌道由来の表面バンドが存在し、かつスピン軌道相互作用によってそのバンドは大きなスピン分裂を起こしていることが予測されていたが、これまでの角度分解型光電子分光ではフェルミ準位下のバンドしか検出できないため、その存在やバンド分裂の様子は明らかになっていなかった。またこの表面バンドは、表面での電子の運動方向に応じて異なるスピン偏極を持つため、従来のスピン縮退した表面バンド電子のように不純物やステップによる散乱において、入射電子と散乱電子が量子干渉を起こすか否かも明らかになっていなかった。

2. 研究の目的

Ag(111)表面上へのBi吸着によって出来るBi $\sqrt{3}$ /Ag(111)表面では、巨大Rashba効果のためにスピン分裂した表面バンドが出現する。これに対し本研究の目的は以下の2つである。

(1) Bi $\sqrt{3}$ 表面のスピン分裂した表面バンド電子の非占有状態の分散関係を量子干渉パターンの実空間観察により、実験により決定する。

(2) Ag(111)表面の一部にBi $\sqrt{3}$ 構造を構築し、Bi $\sqrt{3}$ とAg(111)表面バンド分散のマッチングのために、境界で透過・反射される電子のスピン分極率が、電子エネルギーを適当に選ぶことで0~100%の範囲で制御できることを、Bi $\sqrt{3}$ 領域の周囲に発生する表面電子量子干渉パターンの強度変化の観察を通して実験的に実証する

3. 研究の方法

本研究では、超高真空実験装置内でSi(111)表面上にAgを蒸着することにより、まず初めにSi基板上に厚さ10原子程度のAg(111)超薄膜をエピタキシャル成長させる。これに引き続き、このAg超薄膜の(111)表面にBi原子を吸着させることによって、Bi/Ag(111) $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ 表面を作成する。

この表面の構造と電子状態は、超高真空実験装置内の走査トンネル顕微鏡(STM)により行う。表面に $\sqrt{3}$ 構造が出来ていることは、

STM像においてBi原子サイトが $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ 周期で観測されることにより確認する。またその電子状態は、試料を液体窒素温度に冷却した状態で、この表面のSTM観測中のと寝る電流のバイアス電圧変調に対する微分応答信号(dI/dV信号)を画像化して得られるdI/dV像、および表面の様々な位置における走査トンネル分光(STS)測定によって評価する。バイアス電圧を変化させながら撮った一連のdI/dV像における電子定在波パターンの波長変化から、表面2次元電子系のバンド分散関係を、またSTSスペクトルから表面の電子状態密度を評価する。精度の高いdI/dV像やSTSスペクトルを取得するためには、原子レベルで先鋭化されたSTM探針を準備することが不可欠である。このため、電気化学エッチングで作成したSTM探針先端の原子配列は、超高真空装置に併設した電界イオン顕微鏡(FIM)によりその場で評価し、またその電界蒸発を用いて、先鋭化させた探針を準備して実験に用いた。

4. 研究成果

この研究では、まずはじめにFIM(電界イオン顕微鏡)チャンバーを既存の設備に増設し、研究を推進する主な手段であるSTM(走査トンネル顕微鏡)の空間およびエネルギー分解能向上に欠かせない、先端が原子1個レベルで尖った探針を準備・評価することを可能とした。

またSTMを用い、Si(111)基板上に成長させた厚さ20ML(原子層)のAg(111)エピタキシャル成長膜の上にBiを蒸着した場合の、表面構造変化を丁寧に観察した。この結果、これまで報告されていたBi原子吸着量が1/3MLの場合に現れる $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ 表面構造に加え、Bi原子量が0.45MLを超えた場合にはこれまで全く報告されていなかったストライプ構造が出現することを初めて見出した。さらにこのストライプ構造のSTMによる詳細な観察結果を元に、この構造がAg(111)表面格子に対してBiが最密充填を保ちつつ(3012)という特異な超周期配列を取ったものであることを明らかにした。

これに引き続き、Si(111)基板上にエピ成長させたAg(111)超薄膜表面上のBi $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ 構造表面に対して、STMを用いたdI/dV像測定を行い、この表面のスピン分裂したバンド電子状態における量子干渉によって発生する電子定在波の観測を行った。この結果、スピン分裂したBi $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ 表面においても、ステップ端での電子反射に伴う準粒子干渉による電子定在波パターンが観測されること、この量子干渉は通常の散乱とことない、スピン分裂した2本の票円バンドのそれぞれ同じスピン分極を持ったバンド内散乱が

起こるために発生すること、観測された電子定在波パターンから、スピン分裂した2本の表面バンドを平均したバンド分散関係が求められること、さらにSTSスペクトルから確かにこのバンドはスピン分裂しているバンドであることなどが実験的に始めた明らかになった。

さらに以上の結果に基づき、実際にBi $\sqrt{3}$ /Ag(111)表面にAg原子を供給し、スピン分裂した表面バンドを持ったBi $\sqrt{3}$ /Ag格子構造中にスピン縮退したAg(111)領域を形成し、その界面におけるバンド分散関係のマッチングが起こるエネルギーにおいてスピン偏極方向に応じた電子のフィルタリングが起こる可能性について検証を試みた。しかしサブモノレイヤー程度のAg原子蒸着では、Ag原子はBi $\sqrt{3}$ /Ag格子中にランダムに吸着し、まとまったAG(111)ドメインを形成することはなかった。だが逆にランダムに吸着したAg原子はBi $\sqrt{3}$ /Ag格子のスピン分裂した表面2次元バンド電子を散乱し、結果的にそのバンド分散関係を徐々に破壊していくことが明らかになった。具体的に得られた実験結果から、Bi $\sqrt{3}$ /Ag格子中の電子系の寿命を表すグリーン関数の虚部を評価し、これがそのバンド分散関係の崩壊とどのように関係するかを明らかにすることに成功した。

またBi $\sqrt{3}$ /Ag格子上に10原子層程度のAg薄膜を成長させ、Bi $\sqrt{3}$ /AgとAg(111)ドメイン境界を得ることも試みた。しかしこの場合には、界面にあったBi原子がAg薄膜成長中にサーファクタントとして働き、その表面に全て拡散してきてしまうことも、本研究により明らかになった。

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6件)

- 1) H. Fukumoto, M.Miyzaki,Y. Aoki, K.Nakatsuji and H. Hirayama Initial stage of Ag growth on Bi/Ag(111) $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ surfaces Surface Science 611, pp.49-53 (2013). 査読有 10.1016/j.susc.2013.01.013,
- 2) 平山博之、中辻寛 「【最新表面科学講座】固体表面の電子状態」色材協会誌 Vol. 85, ppp. 25-32 (2012). 査読有 http://www.shikizai.org/Journal/backnumber/vol85/10/427_434.pdf
- 3) H. Fukumoto, Y. Aoki, and H. Hirayama

Decay of Shockley surface state by randomly adsorbed Bi atoms at Ag(111) surfaces

Physical Review B 86, pp.165311(1)-(5) (2012).

査読有 10.1103/PhysRevB.86.165311

4) H. Hirayama, Y. Aoki, C. Kato Quantum Interference of Rashba-type Spin-split Surface State Electrons Physical Review Letters, 107, 0277204(1)-(4) (2011).

査読有 10.1103/PhysRevLett.107.027204

5) C.Kato,Y.Aoki and H.Hirayama, "Scanning Tunneling Microscope of Bi-induced Ag(111) Surface Structures" Physical Review B82, 165407(1)-(7) (2010). 査読有 10.1103/PhysRevB.82.165407

[学会発表] (計12件)

- 1) 福元博之、吉池雄作、青木悠樹、中辻寛、平山博之 ; 「走査トンネル顕微鏡によるAg/Si(111) $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -B界面構造の観察」日本物理学会第68回年次大会 2013.03.26-29@広島大学
- 2) 福元博之、宮崎優、青木悠樹、中辻寛、平山博之 ; 「Bi/Ag(111) $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ 表面上のAg成長」日本物理学会2012年秋季大会 2012.09.18-21@横浜国大
- 3) 福元博之、青木悠樹、平山博之 ; 「Bi吸着に伴うAg(111)表面電子状態の変化」第67回日本物理学会年次大会、2012.03.24-27 (2012)
- 4) H.Hirayama "Quantum interference of Rashba-type spin split surface state electrons" EPFL-Titech Joint Symposium, Hakone, Japan, Jan.30-Feb.3, 2012
- 5) Hiroyuki Fukumoto, Yuki Aoki & Hiroyuki Hirayama: "Bi-induced change in surface state dispersion toward the Rashba spin-split upward parabolas at Ag(111) surfaces", The 6th International Symposium on Surface Science (ISSS6), Tokyo, Japan, Dec.11-15(2011)
- 6) Hiroyuki Hirayama, Yuki Aoki, & Chiaki Kato: "Quantum interference of Rashba-Type Spin-Split Surface State Electrons", The 6th International Symposium on Surface Science (ISSS6), Tokyo, Japan, Dec.11-15(2011)
- 7) 平山博之、青木悠樹、加藤千明 ; 「ラシユバ分裂した表面準位電子の量子干渉 (I I)」日本物理学会 2011年秋季大

会、2011.09.21-24@富山大学

8) Hiroyuki Hirayama, Yuki Aoki, & Chiaki Kato: “Quantum interference of Rashba-Type Spin-Split Surface State Electrons”,

The 28th European Conference on Surface Science (ECOSS28), Wroclaw, Poland, Aug.28-Sept.2 (2011)

9) 平山博之、石原充祥、青木悠樹、加藤千明 ; 「ラッシュバ分裂した表面準位電子の量子干渉」日本物理学会第66回年次大会、2011.03.25-28 新潟大学

10) H.Hirayama, “Surface structure and electronic states of ultra-thin Ag(111) films on Si(111)7x7 substrates”, The 9th Russia-Japan Seminar on Semiconductor Surfaces. Sep. 26-30,2010, Vladivostok, Russia.

11) 加藤千明、青木悠樹、平山博之, “Si(111)基板上にエピタキシャル成長したAg超薄膜表面上のBi原子吸着構造”, 日本物理学会第65回年次大会, 2010.09.25, 大阪府立大学.

12) 加藤千明、青木悠樹、平山博之, “Ag(111)表面上のBi吸着ストライプ構造”, 第71回応用物理学学術講演会, 2010.09.17, 長崎大学.

[その他]

ホームページ等

<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

(2) 研究分担者

青木 悠樹 (YUKI AOKI)
東京工業大学・大学院総合理工学研究科・助教
研究者番号：60514271