

課題番号 : 2024A-E23
利用課題名 (日本語) : 強磁性半導体ヘテロ構造における界面電子状態の解明
Program Title (English) : Unveiling of the interfacial electronic states in ferromagnetic semiconductor heterostructures
利用者名 (日本語) : 小林正起¹⁾, 有川世修¹⁾, 棟方晟啓¹⁾, 堤直也²⁾, 武田崇仁³⁾, 藤森伸一⁴⁾, 竹田幸治⁴⁾
Username (English) : M. Kobayashi¹⁾, S. Arikawa¹⁾, A. Munakata¹⁾, N. Tsutsumi²⁾, T. Takeda³⁾, S. Fujimori⁴⁾, Y. Takeda⁴⁾
所属名 (日本語) : 1) 東京大学大学院工学系研究科, 2) 京都大学人間・環境学研究科, 3) 広島大学大学院先進理工系科学研究科, 4) 日本原子力研究開発機構
キーワード : 強磁性半導体, スピントロニクス, ヘテロ構造, 共鳴光電子分光

1. 概要 (Summary) 目的・用途・実施内容

微細化によって発展した半導体電子デバイスは技術的な限界が近づいており、発展を続ける情報化社会を維持するために新しい原理に基づくエレクトロニクスが切望されている。電子の電荷に加えてスピンを制御することで超低消費電力やスピン現象による新しい機能性デバイスの開発を目指す分野を「スピントロニクス」と呼び、将来のエレクトロニクスとして研究が進んでいる。近年、n 型非磁性半導体 InAs と p 型強磁性半導体(Ga,Fe)Sb のヘテロ構造デバイスにおいて [K. Takiguchi *et al.*, Nat. Phys. **15**, 1134 (2019).]磁場を印加したときの電気抵抗の変化 (磁気抵抗効果) は最大で 80%に達し、金属や絶縁体を用いた同様の構造に比べて約 800 倍大きな値となることが発見された。この磁気抵抗効果は、これまでに知られているどのような磁気抵抗効果と比べても、磁場の方向に対する振る舞いが異なり、新しい磁気抵抗効果と言える。また、ヘテロ接合をトランジスタに加工することで、磁気抵抗の大きさをゲート電圧により変調することが可能であり、電流と磁性の結合を電気的手段によって制御することができる。III-V 強磁性半導体ヘテロ構造におけるこの新しい磁気抵抗効果は、従来の半導体技術との親和性も高く、スピントロニクスデバイスの実用化に向けて重要な発見であると考えられる。この他にも、超伝導体/強磁性半導体ヘテロ構造におけるスピン三重項クーパー対の実現[T. Nakamura *et al.*, Phys. Rev. Lett. **122**, 107001 (2019).]やトポロジカル絶縁体/半導体界面における高移動度量子輸送現象[L. D. Anh *et al.*, Adv. Mater. **33**, 2104645 (2021).]が観測されており、強磁性半導体を用いたヘテロ構造における新しい機能性を有するデバイスの開発が期待されている。

本研究課題では、強磁性半導体ヘテロ構造における界面電子状態の解明を目的として、界面近傍のバンド分散を角度分解光電子分光 (ARPES) および共鳴光電子分光 (RPES) により調べる。軟 X 線 ARPES により、伝導を担う半導体と磁性を担う Fe 不純物バンドを含めた界面でのバンド構造を実験的に明らかにすることを目指した。

2. 実験(目的,方法) (Experimental)

測定には、SPring-8 重元素科学ビームライン (BL23SU) の光電子分光装置を用いた。測定した試料は、InAs/GaFeSb 薄膜である。光電子分光測定は、温度 $T = 300$ K で行い、700-1250 eV の入射光エネルギーを用いた。エネルギー分解能は約 150-300 meV である。

3. 結果と考察 (Results and Discussion)

図 1 に InAs/GaFeSb にて測定された、RPES の測定結果を示す。RPES は Fe $L_{2,3}$ XAS スペクトル(図 1(a))の2つのピーク位置において行った。On1 のエネルギーで測定された Fe 3d 部分状態密度(PDOS)は、4.5 eV 付近に大きな山を持つメインの構造に加えて、価電子帯上端(VBM)近傍の 1.5 eV 付近に構造が観測された(図 1(b))。この構造は GaFeSb 単膜で観測された Fe 3d PDOS の形状に類似している。一方で、On2 で測定された Fe 3d PDOS では、VBM 近傍の構造はほぼ消失している(図 1(c))。この結果は、InAs/GaFeSb ヘテロ構造において、Fe には2種類の状態が存在しており、強磁性に寄与する GaFeSb 単膜と考えられる Fe 3d PDOS が界面近傍に存在することを示唆する。今後は、界面近傍のバンドアライメントを解析し、InAs/GaFeSb の伝導機構の詳細を解明する。

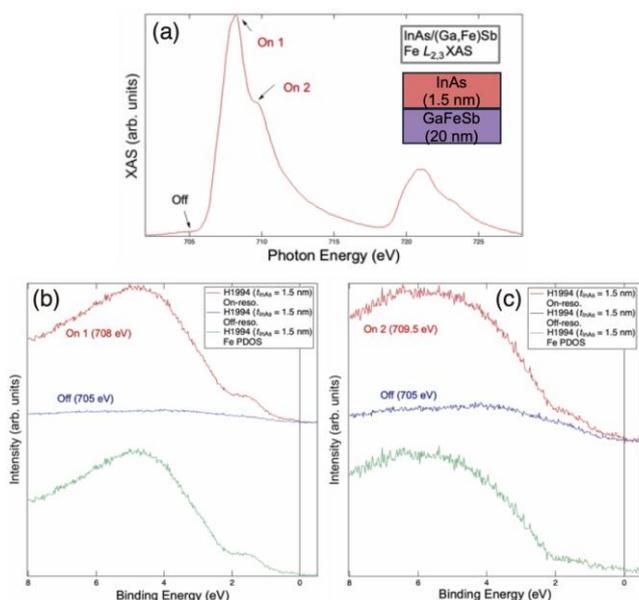


図 1. InAs/GaFeSb 薄膜の共鳴光電子分光. (a) Fe $L_{2,3}$ 端 X 線吸収分光スペクトル. 挿入図は試料構造を示す. (b),(c) RPES スペクトル. それぞれ On1 と On2 のエネルギーで測定された. 共鳴スペクトルと非共鳴スペクトルの差は Fe 3d PDOS を表す.

4. その他・特記事項 (Others)

BL23SU での実験に関して、原子力研究機構の竹田幸治氏、藤森伸一氏、にご支援いただいた。本研究の一部は、スピントロニクス学術研究基盤と連携ネットワーク拠点の支援を受けて行われた。