

課題番号 : 2021A-E24
 利用課題名 (日本語) : 三元混晶半導体を用いた鉄系強磁性半導体薄膜の磁気状態の解明
 Program Title (English) : Elucidation of magnetic states in Fe-doped ferromagnetic semiconductor thin films with ternary semiconductors
 利用者名(日本語) : 岡野諒¹⁾, 武田崇仁¹⁾, 小林正起¹⁾
 Username (English) : R. Okano¹⁾, T. Takeda¹⁾, M. Kobayashi²⁾
 所属名(日本語) : 1) 東京大学大学院工学系研究科
 Affiliation (English) : 1) Department of Electrical Engineering and Information Systems, The University of Tokyo
 キーワード : **Ferromagnetic semiconductor, Photoemission spectroscopy, X-ray magnetic circular dichroism**

1. 概要 (Summary)

電子の「電荷」と「スピン」を組み合わせるスピントロニクスは、「電荷」のみを用いている現在のエレクトロニクスの次の世代の担い手として期待されている。特に半導体スピントロニクスは、既存の半導体技術つまり半導体結晶成長やプロセス技術を応用することができるという強みがある。本研究課題では、強磁性半導体の電子状態を調べることで、強磁性とキャリアの関係を調べることを目的に実験を行った。(In,Fe)Sbと(Ga,Fe)Sbはそれぞれn型、p型の半導体であり、室温を超える強磁性転移温度(T_C)が報告されている[N. T. Tu *et al.* Appl.Phys. Express **11**, 063005 (2018).]. InSbとGaSbの混晶半導体を用いた鉄系強磁性半導体(In_{1-x-y}Ga_xFe_y)Sbは、 $y = 0.05$, $x = 0.06$ ではn型、 $y = 0.3$, $x = 0.06$ ではp型の伝導特性が確認されている。(In,Ga,Fe)Sbにおけるキャリアタイプによる強磁性発現機構を明らかにするためには、伝導特性の変化の過程で

X線磁気円二色性(XMCD)測定を、電子状態(バンド構造)の変化を調べるために共鳴光電子分光(RPES)測定を行った。得られた実験結果は、(In,Ga,Fe)Sbにおいて、Fe 3d状態が強磁性および電気伝導に関連することを示唆する。

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)の光電子分光装置およびXMCD装置を用いた。測定した試料は、分子線エピタキシー法により成長した(In_{1-x-y}Ga_xFe_y)Sb薄膜である。XMCD測定は、温度 $T = 10$ Kで印加磁場の大きさを0.1から7 Tの間で4通り変えてスペクトル測定を行った。RPES測定は、 $T = 10$ Kでそれぞれの試料におけるFe L₃端での測定を行った。

3. 結果と考察 (Results and Discussion)

事前の評価から常磁性と強磁性の状態が確認されて

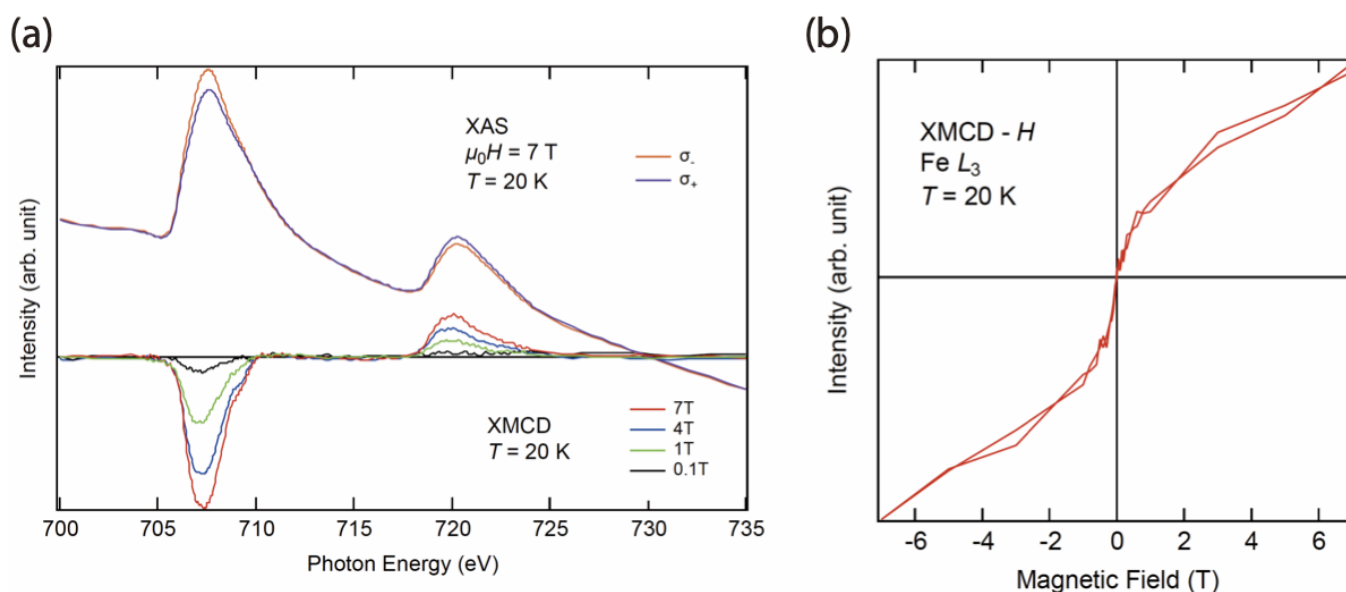


図 1. (In,Ga,Fe)Sb 薄膜の Fe L_{2,3} XMCD スペクトル。(a) Fe L_{2,3} 端での XMCD スペクトル。(b) XMCD-H 曲線。

起こる電子状態・磁気状態の変化を調べる必要がある。(In_{1-x-y}Ga_yFe_x)Sb の磁気状態に関する情報を得るために

いる(In,Ga,Fe)Sb 試料において、XMCD および RPES 測定を行った。図 1(a)は強磁性を示した(In_{0.64}Ga_{0.30}Fe_{0.06})Sb

薄膜で測定された Fe $L_{2,3}$ 端における XMCD スペクトルを示す。金属的なスペクトル形状は、他の鉄系 III-V 族強磁性半導体と Fe イオンの電子状態が類似していることを示唆する。図 1(b)に XMCD 強度の磁場依存性 (XMCD- H 曲線) を示す。XMCD- H 曲線はゼロ磁場近傍で急速に立ち上がり、磁場の増加に伴い緩やかに強度が増大していく振る舞いを見せた。この結果は、Fe により強磁性が発現していること、および強磁性的な Fe 成分と常磁性的な Fe 成分が共存することを示唆する。

図 2(a)は、 $(\text{In}_{0.64}\text{Ga}_{0.30}\text{Fe}_{0.06})\text{Sb}$ 薄膜で測定された Fe L_3 端における RPES スペクトルを示す。Fe 共鳴条件において、明確な共鳴増大 (On resonance スペクトル) を観測した。図 2(b)は、共鳴スペクトルと非共鳴スペクトルの差分である、Fe $3d$ 部分状態密度 (PDOS) スペクトルを示す。Fe $3d$ PDOS は明確な Fermi edge を

示し、Fe $3d$ 不純物バンドが Fermi 準位を横切っていることが分かった。

以上の結果は、 $(\text{In,Ga,Fe})\text{Sb}$ において、Fe $3d$ 状態が強磁性および電気伝導に関連していることを示唆する。常磁性および Ga 濃度が異なる試料の結果 (データ解析中) と比較することで、 $(\text{In,Ga,Fe})\text{Sb}$ における強磁性の起源の解明を目指す。

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。

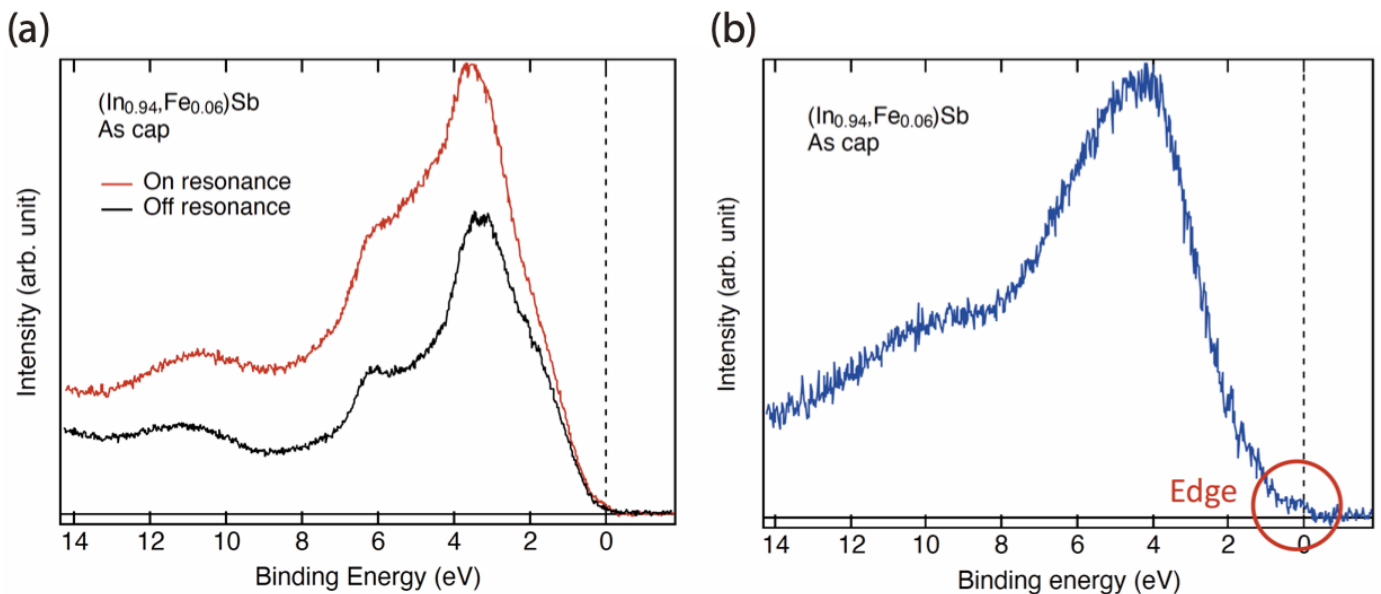


図 2. $(\text{In,Ga,Fe})\text{Sb}$ の Fe L_3 RPES スペクトル。(a) 共鳴および非共鳴スペクトル。(b) Fe $3d$ 部分状態密度。