

高輝度極紫外・軟 X 線を利用した磁性半導体の研究

藤森 淳
東京大学理学系研究科

磁性半導体は古い歴史を持ちながら、次々に新しい物質が合成・開発され、それらの多彩な伝導・磁性とスピントロニクスへの応用の可能性が多くの研究者を惹きつけてきた。これらの物質の特徴的な電子構造の解明には、放射光分光が主導的な役割を果たしてきた。

初期の研究では、極紫外領域の放射光を用いた遷移金属の $3p-3d$ 共鳴光電子分光が威力を発揮した。II-VI 族半導体に Mn をドーピングした反強磁性あるいはスピングラス絶縁体 $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$, $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ [1]、III-V 族半導体に Mn をドーピングした強磁性金属 $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ [2] の Mn $3d$ 電子間の強いクーロン反発と Mn $3d$ 電子-母体 sp 電子間の強い軌道混成が明らかにされ、た。カルコパイライト型 CuFeS_2 の電子構造も同様な手法で解明された[3]。ARPES で $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ のバンド分散や Mn 起源の不純物バンドが初めて観測されたのも、極紫外領域の放射光を用いた実験であった[4]。最近、高輝度軟 X 線の利用が進み、遷移金属の $2p-3d$ 共鳴領域で $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ 等の ARPES が行われている[5]。軟 X 線の持つバルク敏感性と近年の高分解能化で、軟 X 線 ARPES は今後、磁性半導体研究で益々威力を発揮するものと思われる。

高輝度軟 X 線がさらに威力を発揮する軟 X 線発光分光も、 CuFeS_2 から始まり [6]、最近では $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ にも適用されている[7]。軟 X 線発光分光スペクトルの理論解析から、これらの物質における Mn $3d$ 電子と母体 sp 電子の非常に強い混成を定量的に見積もられている。

磁性半導体の磁性を直接調べるには、軟 X 線磁気円二色性 (XMCD) の測定が威力を発揮する。母体や結晶基板の反磁性に影響されない、磁性イオンの磁化を抽出できる XMCD は、多くの磁性半導体に見られる不均一な磁性 (強磁性、常磁性、反強磁性が混在する状態) を調べるのに理想的なツールである。XMCD 強度の磁場依存性、温度依存性の系統的な測定から、強磁性半導体 $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ [8], $\text{In}_{1-x}\text{Fe}_x\text{As}$ [9] 等の磁性の不均一さと、その磁場・温度依存性が議論される。

- [1] L. Ley *et al.*, Phys. Rev. B **35**, 2839 (1987).
- [2] J. Okabayashi *et al.*, Phys. Rev. B **59**, R2486 (1999).
- [3] M. Fujisawa *et al.*, Phys. Rev. B **49**, 7155 (1994).
- [4] J. Okabayashi *et al.*, Phys. Rev. B **64**, 125304 (2001).
- [5] M. Kobayashi *et al.*, Phys. Rev. B **89**, 205204 (2014).
- [6] K. Sato *et al.*, Phys. Status Solidi A **206** (2009) 1096.
- [7] M. Kobayashi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **112**, 107203 (2014).
- [8] Y. Takeda *et al.*, Phys. Rev. Lett. **100** (2008) 247202.
- [9] S. Sakamoto *et al.*, unpublished.