

Cu 基非平衡合金における巨大スピホール効果

増田啓人¹、モダックラージクマール²、関剛斎^{1,2,3}、内田健一^{1,2,3}、ラウヨンチャン^{1,3}、
桜庭裕弥^{2,4}、井口亮²、高梨弘毅^{1,3,5}

(¹ 東北大金研、² 物材機構、³ 東北大 CSRN、⁴ JST PRESTO、⁵ 東北大 CSIS)

Large spin Hall effect in non-equilibrium Cu-based alloys

H. Masuda¹, R. Modak², T. Seki^{1,2,3}, K. Uchida^{1,2,3}, Y. Lau^{1,3}, Y. Sakuraba^{2,4}, R. Iguchi², and K. Takanashi^{1,3,5}
(IMR, Tohoku Univ.¹, NIMS², CSRN, Tohoku Univ.³, JST PRESTO⁴, and CSIS, Tohoku Univ.⁵)

はじめに 非磁性物質におけるスピホール効果および逆スピホール効果は、電流-スピン流間の相互変換を可能にするため、スピントロニクス研究において必要不可欠な現象となっている。スピホール角 (α_{SH}) はその変換効率を意味し、大きな α_{SH} を示す材料の探索がデバイスの高性能化に向けた重要課題である。一般的にはスピン軌道相互作用の大きい Pt や Ta、W など大きな α_{SH} が得られ、これらの単一非磁性金属が代表的なスピホール材料として広く利用されている。一方で、スピン軌道相互作用の小さい物質を母相として、元素添加や合金化によって大きな α_{SH} を実現する研究も報告されている。中でも、現在用いられている配線技術と親和性が良い Cu に対し、Ir^{1,4)} や Bi⁵⁾ を添加することによって数%以上の α_{SH} が得られることは、応用上の大きな利点として注目されている。しかしながら、Cu-Ir 及び Cu-Bi の平衡状態図において固溶限は 10 at.%以下と狭く、熱非平衡状態図にない非平衡合金がどの程度のスピホール効果を示すかは明らかになっていない。そこで本研究では、非平衡 Cu 二元系合金に着目し、組成傾斜膜におけるスピネルチェ効果を熱イメージングすることでスピホール効果を一括評価できるコンビナトリアル手法⁶⁾により、広範な組成領域において Cu-Ir 合金及び Cu-Bi 合金のスピホール効果を調べた。さらに、コンビナトリアル手法により判明した最大の α_{SH} が得られる Cu-Ir に対して高調波ホール電圧測定を行い、 α_{SH} を定量評価した。

実験結果 コンビナトリアルスパッタ装置を用いて、 $Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG) 基板上に 0 nm から 0.5 nm まで層厚を傾斜させたウェッジ形状の Cu 層および Ir 層または Bi 層を交互積層させることによって、総膜厚 10, 20, 及び 30 nm の組成傾斜膜を成膜した。Cu-Ir 組成傾斜膜に対して電子線マイクロアナライザーによる組成分析及び X 線回折法を用いた構造解析を行ったところ、合金組成に対して格子定数が直線的に変化していることが分かった。また、試料断面の透過型電子顕微鏡像には異相が観測されず、これらの構造解析の結果は、広い合金組成範囲において非平衡 Cu-Ir 合金薄膜を実現できていることを意味している。

ロックインサーモグラフィによる熱イメージング用試料には、ワイヤー形状の組成傾斜膜を用いた。スピネルチェ効果による温度変調の空間分布を調べることで、Cu-Ir (Cu-Bi) 合金におけるスピホール効果の Ir (Bi) 濃度依存性を一括評価したところ、Cu-Ir 合金では電流密度あたりの温度変調振幅が $x_{Ir} = 25$ at.% 近傍で極大を示し、この組成領域にてスピホール効果の増大が示唆された。一方、非平衡 Cu-Bi 合金薄膜ではスピネルチェ効果による温度変調が小さく、大きなスピホール効果は観測されなかった。

上記の温度変調が増大した非平衡 Cu-Ir 合金におけるスピホール角を定量評価するため、 Al_2O_3 (0001) 基板上に成膜した $Cu_{76}Ir_{24}/CoFeB$ 二層膜からなるホールバー素子を作製し、ホール電圧の高調波測定を行ったところ、 $\alpha_{SH} = 6.29 \pm 0.19\%$ という値が得られた。この α_{SH} の値は Pt の α_{SH} ⁷⁾ と匹敵する大きさであり、非平衡 Cu-Ir 合金がスピホール材料の候補になることが示された⁸⁾。

参考文献

- 1) Y. Niimi *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **106**, 126601 (2011).
- 2) M. Yamanouchi *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **102**, 212408 (2013).
- 3) J. Cramer *et al.*, *Nano Lett.* **18**, 1064 (2018).
- 4) H. Masuda *et al.*, *Phys. Rev. B* **101**, 224413 (2020).
- 5) Y. Niimi *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **109**, 156602 (2012).
- 6) K. Uchida *et al.*, *Sci. Rep.* **8**, 16067 (2018).
- 7) L. Liu *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **106**, 036601 (2011).
- 8) H. Masuda *et al.*, *Comms. Mater.* (accepted).