

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：82502

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14523

研究課題名（和文）量子井戸効果を用いたスピン軌道トルクの制御：電流 スピン流変換の新しい自由度

研究課題名（英文）Control of spin-orbit torque by quantum-well effect: a new way to the charge-spin current conversion

研究代表者

杜野 (DU, Ye)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所 量子機能創製研究センター・主任研究員

研究者番号：70795319

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、電流誘起スピン軌道トルク(SOT)素子の高効率化によるエネルギー消費の低減を目指し、高電気伝導率な磁性金属/非磁性金属ヘテロ薄膜の量子閉じ込め効果が電流誘起SOTに与える影響を調べた。その結果、SOTの強さ及び符号が非磁性層の膜厚に応じて周期的に振動することが明らかになった。同周期とヘテロ構造の飽和磁場の振動周期がほぼ一致することから、量子閉じ込め効果により電流誘起SOTを制御できることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、磁性金属/非磁性金属ヘテロ構造の量子閉じ込め効果を利用して電流誘起スピン軌道トルクを制御できることが明らかになった。本成果は、電流-スピン流変換に新しい自由度を提供するものであり、今後、本効果による磁化制御の高効率化を図ることでSOT素子の実用化に繋がることを期待できる。

研究成果の概要（英文）：Aiming at the realization of efficient charge-spin current conversion and low-energy consumption in current-induced spin-orbit torque devices, we have studied the current-induced spin-orbit torques in (001)Cu/Co bilayer hetero-structure as a function of Cu layer thickness. As a result, the spin-orbit torque oscillates as a function of Cu thickness, where the oscillation period agrees with the interlayer exchange coupling theory which is interpreted with a quantum confinement model. Our results suggest that the current-induced spin-orbit torque in (001) Cu/Co can be controlled by coherent confinement of electrons in Cu.

研究分野：材料工学

キーワード：スピン軌道トルク

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 電流誘起スピン軌道トルク(SOT)は磁性材料の磁気モーメントの向きを電氣的に制御できることから、不揮発性磁気メモリへの応用性が期待されている。従来のSOT素子は5d重金属材料を用いて電流-スピン流の変換を利用し、磁性材料の磁気スピン向きを制御する。しかし、重金属材料(-Ta, -W等)を用いた積層薄膜は低電気伝導率であるためエネルギー損失が高い。これからSOT素子の実用化には効率的磁化制御や消費エネルギーの削減が求められている。

(2) 最近、高電気伝導率な3d磁性金属/非磁性金属ヘテロ構造は界面電流-スピン流変換が報告され、効率的磁化制御や低エネルギー損失を実現する可能性が示された。さらに、(001)磁性金属/非磁性金属ヘテロ構造(Co/Cuなど)は、非磁性材料のフェルミ面による量子閉じ込め効果が報告されており[1]、非磁性層におけるコヒーレントな電子伝導がSOTに影響する可能性がある。

### 2. 研究の目的

本研究は、高電気伝導率を有す磁性金属/非磁性金属ヘテロ構造における量子閉じ込め効果がSOTに与える影響を解明することを目的とする。具体的には、非磁性層におけるフェルミ面で生じた量子閉じ込め効果が電流誘起SOTの強さ及びその符号を制御できるかを検証する。

### 3. 研究の方法

(1) 磁性金属/非磁性金属ヘテロ薄膜やSOT素子の作製：マグネトロンスパッタ装置を使用して(001)磁性金属/非磁性金属ヘテロ薄膜を酸化基板の上に堆積し、薄膜の結晶構造をX線回折法や反射高エネルギー電子回折法で評価した。ヘテロ薄膜を積層した上で、SOTホール素子をフォトリソグラフィ法で作製した。SOTのCu層膜厚依存性を考察するために、(001)磁性金属/非磁性金属/磁性金属ヘテロ薄膜を作製し、試料の磁気特性を磁気カー効果で調べた。

(2) 電流誘起SOTの測定：外部磁場を薄膜面内方向に印加し、交流電流をホール素子の縦方向にかけながら横方向のハーモニックホール電圧を測定した。

(3) 理論計算：実験結果を理解するために、(001)磁性金属/非磁性金属ヘテロバンド構造を第一原理計算で行った[2]。

### 4. 研究成果

(1) 図1に示すように、Co/Cu( $t_{Cu}$ )ヘテロ薄膜を用いたSOT素子におけるダンピングトルク $\xi_E^{DL}$ の強さ及び符号が非磁性層Cuの膜厚に応じて周期的に振動するように変化することが分かった。これは、非磁性金属Cuに関するスピン拡散理論では説明困難であり、スピン依存する量子閉じ込め効果[3]を考慮することにより説明できる。実験で得られたダンピングトルクの結果は、振動周期が $10\text{\AA}$ になるダンピング方程式でフィッティングできる。

(2) 図2に示すように、Co/Cu( $t_{Cu}$ )/Coヘテロ薄膜における面内飽和磁場はCu膜厚に依存し、振動周期が $9\text{\AA}$ になることが分かった。ヘテロ接合の飽和磁場とSOTの振動周期( $10\text{\AA}$ )がほぼ一致することから、電流誘起SOTを量子閉じ込め効果で制御できることが明らかになった。

(3) 実験結果を考察するために、(001)磁性金属/非磁性金属ヘテロ構造の理論計算を行った[2]。その結果、ヘテロ構造における量子閉じ込め状態は、非磁性金属のブリルアンゾーンの中心に近いフェルミ面近傍に生じることが示された。さらに、この非磁性金属層の量子閉じ込め状態は隣接する強磁性金属層の電子状態と結合し、強磁性材料層のスピンホール効果に影響を及ぼすことを示唆する。

(4) 本研究により、高電気伝導率な磁性金属/非磁性金属ヘテロ構造における量子閉じ込め効果を利用して電流誘起SOTの強さと符号を制

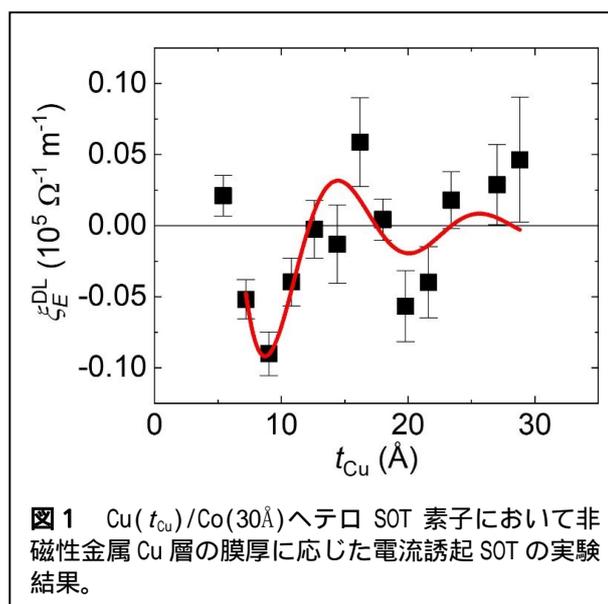
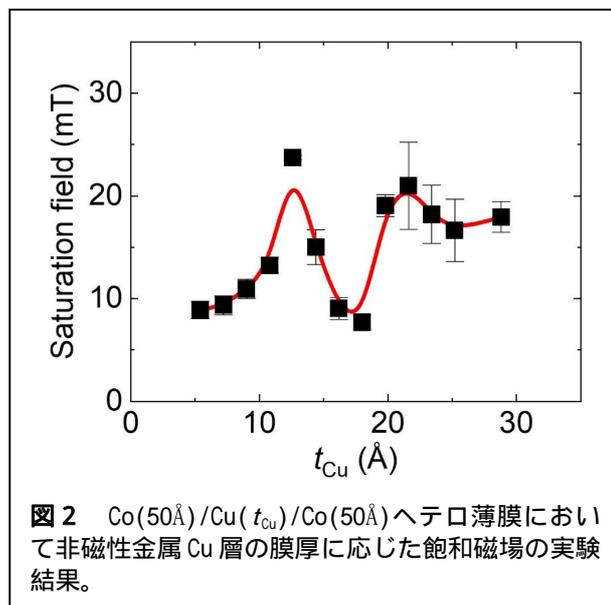


図1 Cu( $t_{Cu}$ )/Co( $30\text{\AA}$ )ヘテロSOT素子において非磁性金属Cu層の膜厚に応じた電流誘起SOTの実験結果。

御できることが明らかになった。本成果は、電流-スピン流変換に新しい自由度を提供するものであり、今後、本効果による磁化制御の高効率化を目指すことで SOT 素子の実用化に繋がることを期待できる。

<引用文献>

- [1] M. Stiles, PRB **48**, 7238 (1993)
- [2] 未発表データ (国際共同研究)
- [3] S. Yuasa *et al.*, Science **297**, 234 (2002)



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 Ye Du, Songtian Li, Shinji Isogami, Phillip Bentley, Junsaku Nitta, Seiji Sakai
2. 発表標題 Spin-orbit torque switching study on a ferrimagnetic Heusler alloy thin film Mn-Fe-Ga
3. 学会等名 2022年第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ye Du, Shutaro Karube, Makoto Kohda, and Junsaku Nitta
2. 発表標題 Possibility of controlling spin-orbit torque with quantum confinement effect
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------