

整理番号	2019-J-013	報告者氏名	大島諒
------	------------	-------	-----

研究課題名

量子計算への展開を目指した強磁性薄膜を用いたチューナブルなマグノン・フォトン強結合の研究

<代表研究者> 機関名：京都大学 職名：助教 氏名：大島諒

<共同研究者> 機関名： 職名： 氏名：
 機関名： 職名： 氏名：
 機関名： 職名： 氏名：
 機関名： 職名： 氏名：

<研究内容・成果等の要約>

本研究で目指すものは、量子力学的に振る舞う「粒子」(マグノンとフォトン)を情報の単体とし、これらの粒子のコヒーレンスの利用による量子計算の実現に向けた基盤技術・学理を整備することにある。共振器マグノニクスと呼ばれる、フォトン(マイクロ波)とマグノンの結合を顕在化させることで量子もつれ機能を誘起することが重要であり、マグノン励起に必須となる磁性体を用いた強結合状態の観測が行われてきた。しかし、強結合状態の生成には極低温状態や磁化補償点付近での磁化の消失など特殊な環境や条件が必要であり、室温近傍、または外場によるチューナブルなマグノン・フォトン結合の制御と強結合は全く実現していない。本提案では、マグノン励起の媒体としてCo超薄膜を選択し、チューナブルなマグノン・フォトン強結合を目指す。Co超薄膜は、イオン液体を用いた高効率ゲート電圧印加方法であるイオンゲートによって磁性の発現するキュリー温度を室温近傍で大幅に変調することができ、かつマイクロ波照射と静磁場印加によって強磁性共鳴(FMR)状態を生成できることによるマグノン励起が可能であることが古くから知られており、本研究提案で目指す量子もつれ機能の発現に極めて好適である。

本提案ではCo超薄膜の形成が重要である。ここで、超薄膜の定義は、薄さが1~2nm程度の非常に薄い連続膜とする。この程度の薄さの金属膜では内在するキャリア(自由電子)がバルクの場合と比べ非常に少なく 10^{21} cm^{-3} 程度になることと、それ故イオンゲートによって強電界を効率よく印加することができる。一方、超薄膜においては、基板の平坦性など外的要因によるマグノン散乱の影響が顕著となり、強結合状態の観測に必要な長いマグノン寿命が損なわれ、フォトンとマグノンの結合状態を長く安定に維持することが難しい。本研究では、Co超薄膜成長の下地層にTaを採用することで、Co超薄膜におけるFMR信号の観測に成功した。通常薄さ1nmの強磁性金属では外因性のマグノン散乱によりFMRの観測が不可能となるが、Co/Taにおいては薄さ1nmにおいても明瞭なFMR信号が観測可能であり、その磁気緩和の大きさはバルクと同程度まで低減できることを明らかにした。このCo超薄膜Taを用いることで、チューナブルなマグノン・フォトン強結合の実現が可能となる。

<研究発表（口頭、ポスター、誌上別）>

【英文学術論文雑誌】

1. S. Yoshii, R. Ohshima, Y. Ando, T. Shinjo, and M. Shiraishi, “Detection of ferromagnetic resonance from 1 nm-thick Co”, Scientific Reports **10**, 15764 (2020).

【国際学会】

2. S. Yoshii, R. Ohshima, Y. Ando, T. Shinjo, and M. Shiraishi, “Realization of FMR with narrow linewidth and small magnetic resonance field in 1nm-thick Ultrathin Co Film”, The 25th symposium on the Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductors, 2020/11, Online, Poster
3. S. Yoshii, R. Ohshima, Y. Ando, T. Shinjo, and M. Shiraishi, “Realization of Ferromagnetic Resonance in 1 nm Co ultrathin film”, 65th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 2020/11, Online, Poster

【国内学会】

4. S. Yoshii, R. Ohshima, Y. Ando, T. Shinjo, and M. Shiraishi, “Realization of Ferromagnetic Resonance in 1nm Co ultrathin film”, 第 81 回応用物理学会秋季講演会, 2020/9, Online, Oral
5. S. Yoshii, R. Ohshima, Y. Ando, T. Shinjo, and M. Shiraishi, “Ferromagnetic resonance of Co ultrathin film”, 第 67 回応用物理学会春季学術講演会, 2020/3, 上智大, Poster

<研究の目的、経過、結果、考察（5000 字程度、中間報告は 2000 字程度）>

本研究で目指すものは、量子力学的に振る舞う「粒子」（マグノンとフォトン）を情報の単体とし、これらの粒子のコヒーレンスの利用による量子計算の実現に向けた基盤技術・学理を整備することにある。共振器マグノニクスと呼ばれる、フォトン（マイクロ波）とマグノンの結合を顕在化させることで量子もつれ機能を誘起することが重要であり、マグノン励起に必須となる磁性体を用いた強結合状態の観測が行われてきた。しかし、強結合状態の生成には極低温状態や磁化補償点付近での磁化の消失など特殊な環境や条件が必要であり、室温近傍、または外場によるチューナブルなマグノン・フォトン結合の制御と強結合は全く実現していない。本提案では、マグノン励起の媒体として Co 超薄膜を選択し、チューナブルなマグノン・フォトン強結合を目指す。Co 超薄膜は、イオン液体を用いた高効率ゲート電圧印加方法であるイオンゲートによって磁性の発現するキュリー温度を室温近傍で大幅に変調することができ、かつマイクロ波照射と静磁場印加によって強磁性共鳴（FMR）状態を生成できることによるマグノン励起が可能であることが古くから知られており、本研究提案で目指す量子もつれ機能の発現に極めて好適である。

本提案では Co 超薄膜の形成が重要である。ここで、超薄膜の定義は、薄さが 1 ~ 2 nm 程度の非常に薄い連続膜とする。この程度の薄さの金属膜では内在するキャリア（自由電子）がバルクの場合と比べ非常に少なく 10^{21} cm^{-3} 程度になることと、それ故イオンゲートによって強電界を効率よく印加することができ、総キャリア数が 50% 程度、スピン軌道相互作用由来のスピン変換効率を 2 桁以上変調できることが、Pt 超薄膜を対象材料として、申請者所属の研究室で昨年報告された[1]。また、特に Co 超薄膜では、キュリー温度を室温付近で 80K 以上変調できることも他の研究機関で報告されている[2]。以上を踏まえて、Co 超薄膜にイオンゲートによる強電界を印加してキュリー温度を変調しながらキャリア数（＝スピン数）を連続的に変調し、さらに ESR キャビティ中で FMR 状態を生成することでマグノンを励起し、フォトンと結合させることがマグノン・フォトン強結合観測に必要となる。

一方で超薄膜においては、基板の平坦性など外的要因によるマグノン散乱の影響が顕著となり、強結合状態の観測に必要な長いマグノン寿命が損なわれ、フォトンとマグノンの結合状態を長く安定に維持することが難しい。実際に、通常薄さ 1 nm の Co 超薄膜では外因性のマグノン散乱により FMR の観測が不可能となった。そこで本研究では Co 超薄膜の下地層に Ta を採用することで、基板の平坦性の向上より外因性のマグノン散乱を抑制し、Co 超薄膜においても FMR 信号を観測することを目的とする。

図 1 に試料構造を示す。熱酸化 Si 基板上に 2 種類の試料を作製した：SiO₂/Co ($t_{\text{Co}} = 1, 2, 3, 5 \text{ nm}$) (type-A) と SiO₂/Co($t_{\text{Co}} = 1 \text{ nm}$)/Ta($t_{\text{Ta}} = 2, 3, 4, 5 \text{ nm}$) (Type-B)。測定には ESR 装置を用いた。試料を取り付けた石英棒を TE₀₁₁ 共振器に挿入することでマイクロ波を印加し、外部磁場 (H) を掃引することで FMR 信号を観測した。測定はすべて室温で行った。

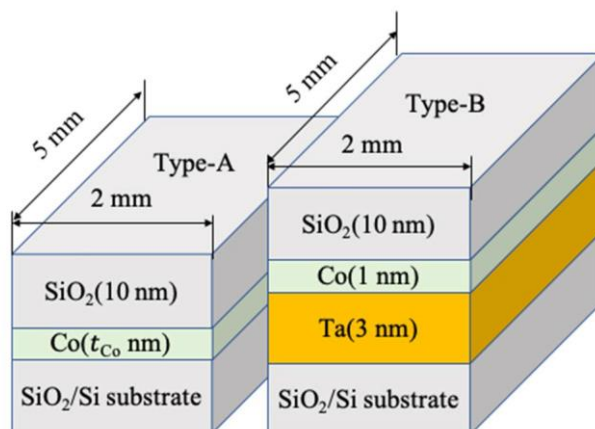


図 1：測定に用いた試料構造

図2にFMR信号の観測結果を示す。図2(a)はType-Aの試料であるが、Coの膜厚が薄くなるにつれFMR信号がブロードになり、1 nmでは共鳴信号が見えなくなった。FMR信号は磁場について積分することでマイクロ波の吸収信号となり、これをローレンツ関数でフィッティングすることにより、共鳴磁場 (H_{res}) および半値半幅 (ΔH) を得ることができる。 ΔH は磁気緩和 α に比例し、 ΔH が小さい、つまり共鳴信号が急峻になるほど磁気緩和が小さいことを意味する。図2(b)はCoの膜厚が1 nmにおけるType-AとType-B($t_{\text{Ta}} = 3$ nm)の試料から得られるFMR信号を示す。Ta下地層を挿入することで、FMR信号が明瞭かつ急峻に現れることが確認できた。図2(c)に各試料の信号をフィッティングし得られるパラメータのCo膜厚依存性を示す。Ta下地層の導入により $t_{\text{Co}} = 5$ nmの試料と同程度まで磁気緩和 α が小さくなることが確認できた。

続いて、Type-BについてTaの膜厚 t_{Ta} を変化させたときのFMR信号の変化について調べた。下地層であるTaの膜厚が薄いほど、よりCoに高効率に電界が印加可能であるため、Taの厚さを2 nmまで薄くし α が変化するか確認した。結果を図3に示すが、 α は t_{Ta} を薄く2 nmまで薄くしても大きく変化しないことが明らかとなった。

以上より、僅か2 nmのTa下地層を挿入することにより、厚さ1 nmのCo超薄膜においてもFMR信号が明瞭に観測することが可能となる。この非磁性層挿入による磁気緩和低減メカニズムを解明することにより、Co超薄膜におけるマグノン・フォトン強結合の実現、ひいては室温におけるチューナブルな強結合状態の変調の実現が期待できる。

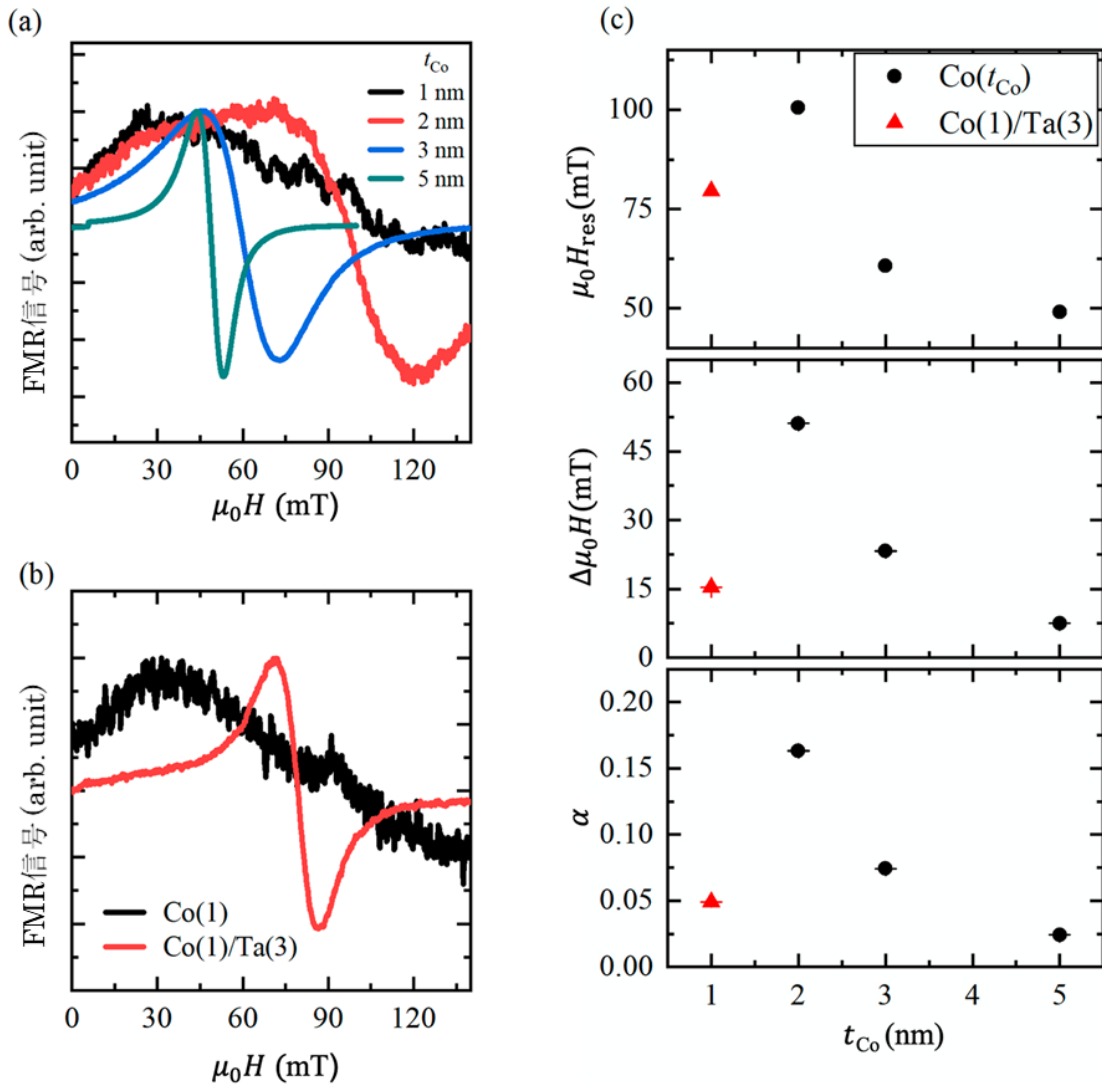


図2 : (a) Type-A から得られる FMR 信号。(b) $t_{\text{Co}} = 1$ nm における Type-A と Type-B から得られる FMR 信号。(c) 各信号をフィッティングして得られる共鳴磁場 H_{res} 、半値半幅 ΔH 、および磁気緩和定数 α の t_{Co} 依存性

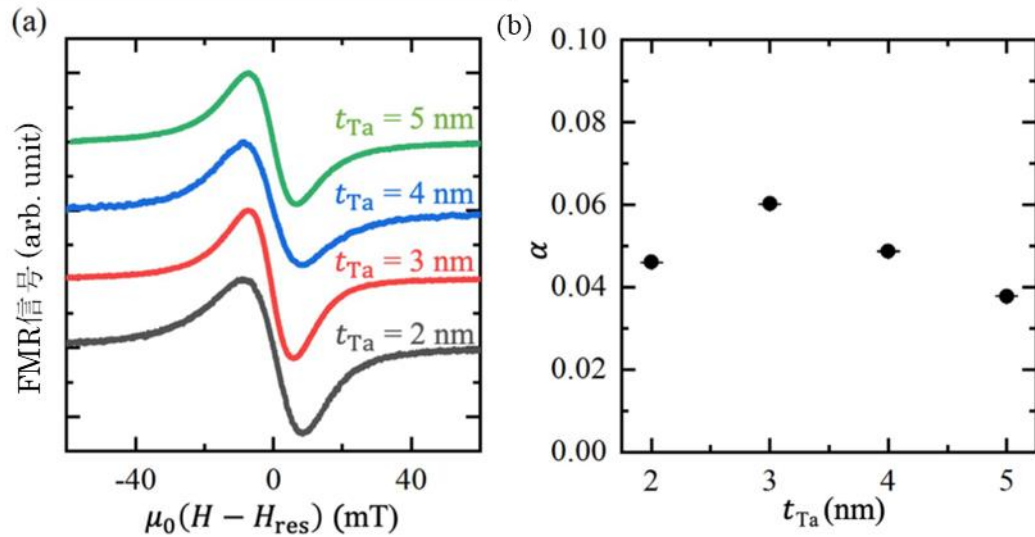


図 3 : (a) Type-B から得られる FMR 信号。 (b) (a) から得られる磁気緩和定数 α の t_{Ta} 依存性

参考文献

- [1] S. Dushenko *et al.*, Nat. Commun. **9**, 3118 (2018). [2] K. Shimamura *et al.*, Appl. Phys. Lett. **100**, 122402 (2012).