

2020年度 固体電子物性研究室（旧強相関電子磁性 II）

1. メンバー

准教授 : 松山 秀生 011-706-4416 matsu@phys.sci.hokudai.ac.jp

MC2 : 下田 晨人

MC1 : 佐藤 美銀、朴 光緒

4年生 : 江田 拓己

2. 研究成果

2. 1 SrTiO₃ 上の Pd 超薄膜の磁性の研究

Pd は常磁性の貴金属であるが、近年 SrTiO₃(001) (STO) 上の単結晶 Pd 薄膜の特定の膜厚 (3.3、4.3、5.3 nm) において室温で強磁性が発現することを慶應大のグループにより報告された。量子井戸状態を取り入れた理論はこの現象をよく説明したが、磁気転移温度、磁化容易軸方向、磁気異方性など実験的にも理論的にも未だ不明な点が多く、実験データの蓄積が期待されている。一方上記理論では強磁性が発現する膜厚から 1 原子層ずれのだけで非磁性になることが予想されている。しかし、これまでの実験では膜厚の揺らぎがあるため原子 1 層の精度の議論はできなかった。またナノメータでのスピン分布の顕微鏡観察も行われてこなかった。そこで原子レベルで平坦な幅数 100 nm 程度のテラスをもつ理想的な Pd 薄膜を作製し、その磁性をスピン偏極走査トンネル顕微鏡 (スピン偏極 STM) を用いて評価し、Pd(001)薄膜の磁性とナノ構造の関係を明らかにする研究を 2020 年 4 月より科研費の補助を得て開始した。

STO 上に理想的な Pd 超薄膜を形成する必要があるが、STO 表面は原子レベルで平坦で表面原子が規則的に配列している必要がある。そこで、STM、Auger 電子分光装置、Ar⁺スパッターイオン銃等を用いて STO の処理を行なった。フッ化処理した STO(001)を超高真空中で脱ガス処理 (800°C) した後、約 1000°C、1 時間の熱処理をすることで原子レベルで平坦な TiO₂ 表面のみが現れる。しかし、その表面の原子は規則的に並んでおらず、不規則で酸素欠陥と思われる窪みも多数生じていた。脱ガス時間・温度、Ar⁺スパッター、熱処理温度・時間等をパラメーターとして STO 表面原子が規則的に並ぶ条件を調べることにした。その結果、上記 1000°C、1 時間の熱処理を行なった後、一度 Ar⁺スパッターを行い、引き続き 1000°C、1 時間の熱処理を行うと STO 表面に $\sqrt{5} \times \sqrt{5} - R26.6^\circ$ の原子が規則的に並んだ再構成面を得ることができた。ただし、再構成面が形成した領域はごく局所的で周りは数ナノメートルの凹凸が生じ、平坦面ではない。

2. 2 スピン偏極走査トンネル顕微鏡用 2D 磁場印加機構の開発とスピン方向検出への応用

スピン偏極 STM 用に面内 2 成分検出を可能とする磁性探針を開発した。それは W ワイヤに $\phi 0.5$ mm 程度のガラスビーズを取り付け、導伝性膜 (AuPd 等) を成膜し (ガラスビーズ上の磁性膜と W ワイヤ間の導通と取るためのもの)、さらに保磁力の小さい磁性

薄膜 (NiFe 薄膜) を成膜していた。しかし、スピン信号を検出できない探針が多いことが大きな問題になっていた。磁性探針はスピン観察前に超高真空中で 300°C、10 分間程度の熱処理を行うが、この熱処理後 NiFe 薄膜上に Pd が 10~20%程度析出することが Auger 電子分光に判明した。この析出を回避するため、AuPd の代わりに NiFe、あるいは Cr 薄膜を用いることで回避することとした。この NiFe、あるいは Cr 薄膜を導伝性をとるための薄膜として用いた磁性探針で磁性試料のスピン方向の定量検出を進めている。

W 等の高融点材料の清浄化するために電子衝撃加熱機構 (EB 加熱機構) をユニソク製 STM 用に開発したが、現在スピン偏極 STM として使用しているオミクロン製極低温 STM (LT-STM) で使用している EB 加熱機構では高融点材料には適用できなかった。これは 2000°C以上の加熱時に真空度の悪化が激しく清浄化できないためである。このため LT-STM 用に高融点材料の清浄化も可能な EB 加熱機構の設計・製作を行なった。EB 加熱機構は高温でも真空度の悪化を防ぐため、構造材として W、Mo、Ta 等の高融点材料を使用し、なおかつ試料周りの構造材をなるべく小さくした構造とした。また熱電子用のフィラメントを市販品の 35 W のハロゲンランプを使用した。これはフィラメントの特性が一定であり、フィラメント寿命を長時間する効果がある。設計後、大学内の機械工作室で部品を製作し、研究室で組み上げ、性能評価を行なった。200 W の電力 (加速電圧 3 kV、エミッション電流 : 67 mA) で W 試料で 2000°C以上の加熱が可能となり、また約 4.5 s のフラッシング加熱で 2.5 s 間約 2000°Cを維持することができ、そのときの真空度は 1×10^{-9} mbar 以下であった。これは W の清浄化に必要な熱処理であり、この W(110)の清浄化処理後、原子レベルで平坦な幅 100 nm 程度のテラスとステップで構成されていることを STM で確認した。また dI/dV スペクトルの 0 V 近傍のピークも観察することができた。さらに Auger 電子分光によりメインの不純物である C が検出感度レベルまで減少したことも確認した。現在、この清浄化した W(110)上に Fe、Ni を成膜してその磁性をスピン偏極 STM で調べる予定である。

2. 3 スピン偏極走査電子顕微鏡

日立との共同研究でスピン偏極走査電子顕微鏡 (スピン SEM) を日立が研究開発している磁性材料に応用している。前年度開発した Fe 薄膜スピン検出器をスピン SEM に取り付け、立ち上げ性能評価を行い、正常動作していることを確認した。Figure of merit はこれまで使っていた Mott 検出器と比べ数倍になっていることを確認した。また日立の磁性材料への応用を行なっている。

3. 成果発表

<原著論文>

該当なし

<著書>

該当なし

<解説>

該当なし

4-1. 学術講演（国際学会・国際シンポジウム）（*講演者）

<招待講演>

該当なし

<一般講演> 《ポスター発表》

該当なし

<一般講演> 《ポスター発表》

該当なし

4-2. 学術講演（国内学会・国内その他）（*講演者）

<一般講演> 《ポスター発表》

該当なし

5. 国際学会および国際シンポジウムの組織・運営等

<組織・運営委員>

該当なし

6. 在外研究

該当なし

7. 科研費、助成金等の取得状況

・科研費 基盤研究C 「4d 遷移金属超薄膜のスピン分布観察による磁性評価と強磁性発現機構の解明」 1,560 千円（2020年4月1日～2021年3月31日）

・日立製作所との共同研究「スピン偏極走査電子顕微鏡（スピンSEM）を用いた磁性体の研究2」 2,700 千円（2019年4月1日～2020年3月31日）

8. その他

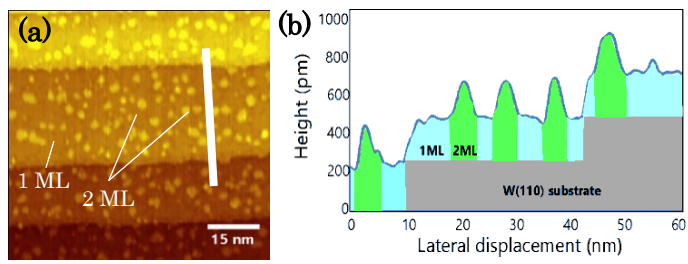


Fig. 4 基板温度 670 K で成膜した 1.2 ML Ni / W(110)の凹凸像
(a)、凹凸像内にある白線のラインプロファイル(b)

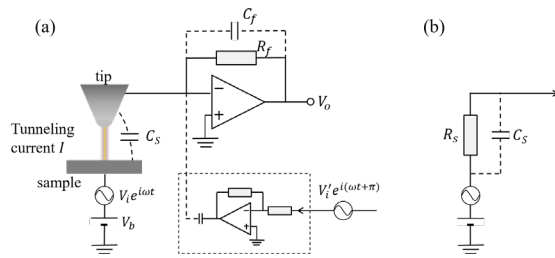


Figure 1 (a) STM circuit including a mechanism which cancels the current flowing through C_s (dotted area). (b) A simple model of the tip and sample.

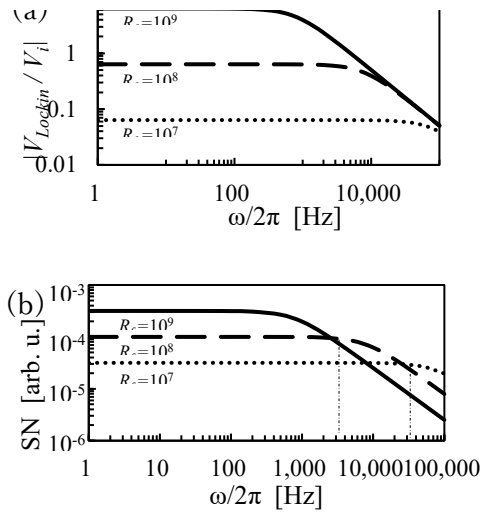


Figure 2 ω -dependence of $|V_{Lockin}/V_i|$ (a) and SN ratio (b) at $R_f = 10^9, 10^8, 10^7 \Omega$ ($C_f = 0.2$ pF, $R_s = 10^8 \Omega$)