

スピン計測 — スピン SPM の開発とスピン制御 —

研究代表 北海道大学大学院工学研究科 武笠 幸一

Spin Investigation —Development of Spin SPM and Control of Spin States—

Koichi Mukasa

Graduate School of Engineering, Hokkaido University

1. 研究目標

電子についての従来の視点：質量・電荷から脱却して「スピン」の視点で考える新分野、すなわちスピンの関与する量子現象を積極的に用いた新世界を切り拓くことを目的とする。またCRESTの研究申請時のスケジュールを図1に示す。

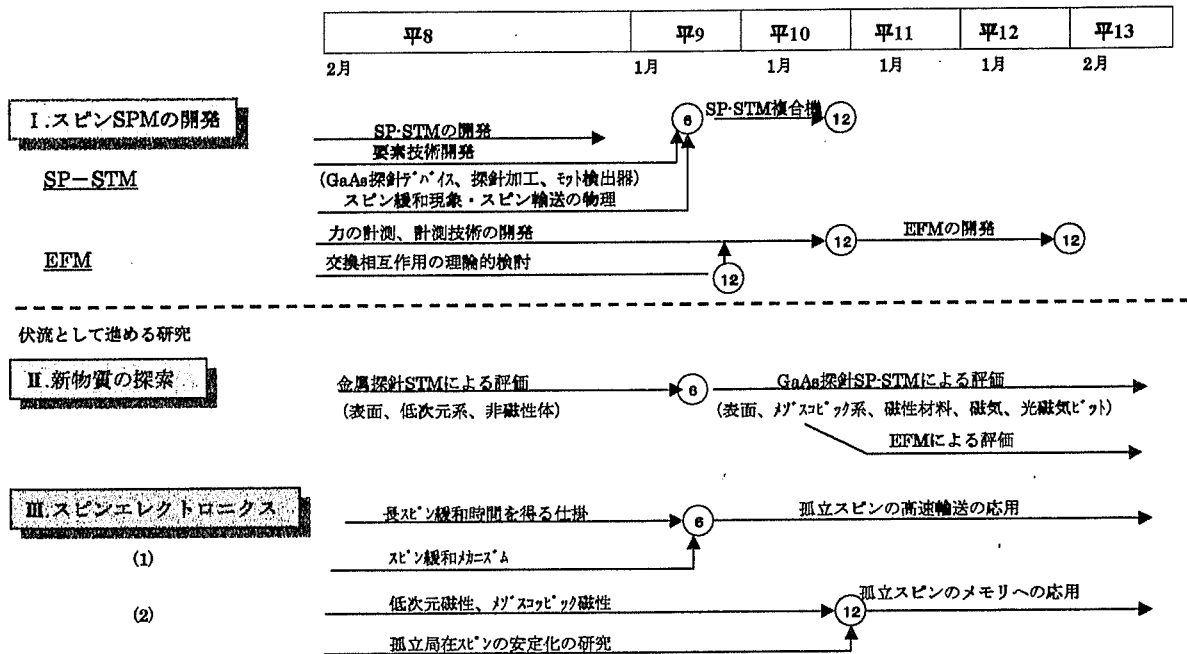


図 1. スケジュール

2. 現状

このスケジュール表にそって以下、現状を述べる。

I. スピン SPM の開発

[1] スピン偏極 STM (SP-STM) の開発 (末岡：ポスターセッション参照)

GaAs など閃亜鉛構造 III-V 属化合物半導体では光学的選択則により伝導帯にスピン偏極電子の励起が可能である。探針として光励起 GaAs を用いた SP-STM の開発を進めてきた。STM の実験においては試料および探針の表面状態がある程度分かっていることが、観測した電子状態の理解に必須である。まずスピン状態の良く分かった表面をもつ試料について考える。エピタキシ

ヤル成長による成膜を試み、原子オーダーで平坦な清浄表面を有する Fe (001) / MgO (001) 薄膜試料の作製に成功している。Fe 薄膜表面にはシングルステップ、ラセン状結晶成長、C (2 × 2) 再構成面、ラセン状結晶成長等が観測された。円偏光励起 GaAs 薄膜劈開探針を用いてこの Fe 薄膜のトンネル電流像が得られ、スピン依存の画像も得られた。他方半導体探針先端が

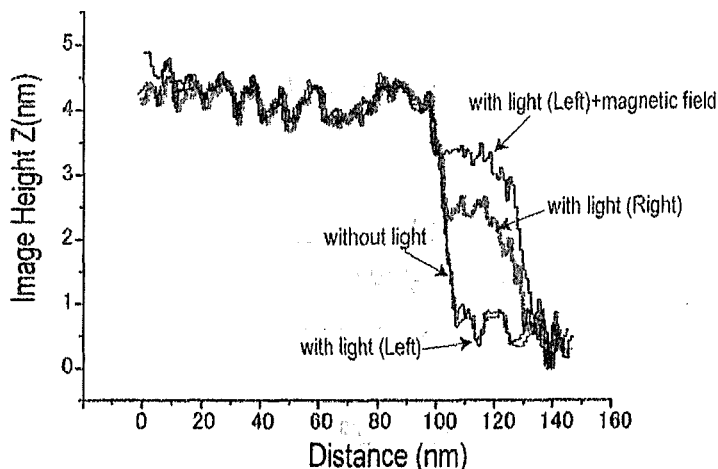
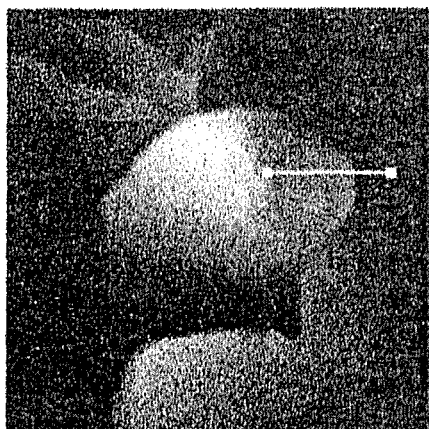


図 2(a) Fe/Au 薄膜の左円偏光照射時のトポ像

図 2(b) Fe/Au 薄膜トポ像の断面

清浄で安定に働くことを目指して、種々の試みを行った。探針としては GaAs バルク劈開および GaAs 薄膜劈開のものを対象とし、双方共 in-situ で劈開することにより清浄で安定な特性を再現性良く示す探針を得ることが出来た。結果として Fe (001) / MgO (001) の STS では GaAs のバンドギャップが明確に区別出来、再現性が良く安定して測定出来た。MgO (001) 基板に成膜した Au 薄膜上の 3nmFe 薄膜の STM 像を図 2 に示す⁽¹⁾。図 2(a)は GaAs 探針に左円偏光照射時のトポ像であるが、光照射なし、左・右円偏光照射、磁場を印加した状態で左円偏光照射時の同じ箇所の image height の断面図を図 2(b)に示す。左右円偏光と磁場印加によりトンネル電流変化が見られる。これらの試料および探針の組み合わせで測定を行い、偏極像が得られており、得られた像の合理的理解を得るために GaAs および Fe (C (2 × 2)、(1 × 1)) の表面準位の検討、表面準位を介してのトンネリング、S 等による修飾表面の作製、試料の消磁状態、磁気異方性を付与する方法、印加磁場等の検討を行っている。結果として明確に解釈出来るスピン偏極像が得られることを目指し実験中である。

〔2〕 交換相互作用力顕微鏡 (EFM) の開発 (細井、木村：ポスターセッション参照)

物質表面のスピン状態を調べる第 2 の方法として、試料表面原子との交換相互作用を計測することを考え、非接触 AFM (NC-AFM) の技術を利用する方法および走査磁気抵抗効果顕微鏡 (SMRM) の技術を適用する 2 方法を検討した。実験条件を明らかにするために第一原理的にバンド計算を行った。結果として、試料 Fe-探針 Fe の系で力の大きさが 10^{-9} N (2.8Å より近い距離で)、 10^{-10} ~ 10^{-11} N (2.8Å から 4.2Å) で、原理的に原子分解能が得られることが分かった。カンチレバーのバネ定数および非常に近い距離 (接触から数Åの間) での制御性を考えると NC-AFM の技術が適用出来ると考え、検討を始めた (図 3)。結果として反強磁性 NiO (001)

劈開面の原子像の観測に成功した⁽²⁾。絶縁物で NC-AFM で観測されている物質は TiO_2 、 NaCl 、 CaF_2 とごく数は少ない。 NiO (001) は up spin と down spin の列が交互に並ぶスピン構造を持っており、Fe 探針によりトポ像で見られないクラスタ構造が観測された。この像については解釈は出来ていないが、探針の磁化状態に依存すると考えられ、他の材料 (Ni、Co 等) による検討も行っている。

また清浄で原子オーダーで平滑な表面を再現性良く作るために、in-situ での劈開法の検討を行った。劈開のための力の印加速度、治具エッジ、切り込み等についての検討を積み重ね再現性の良いデータが得られる様になった。結果としては単結晶の周期性の中に構造欠陥のある真の原子像が得られている。

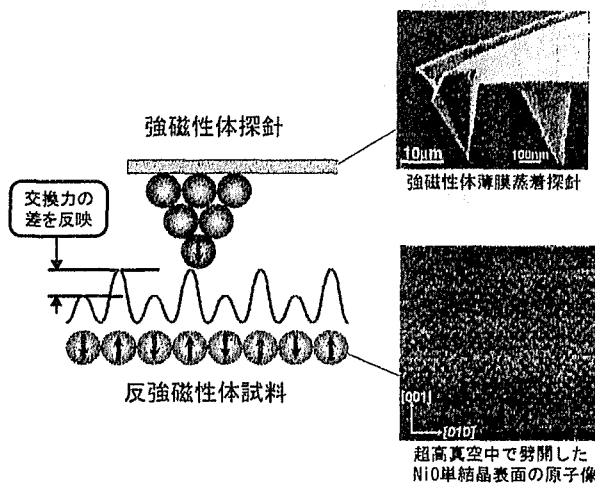


図3 交換相互作用力顕微鏡

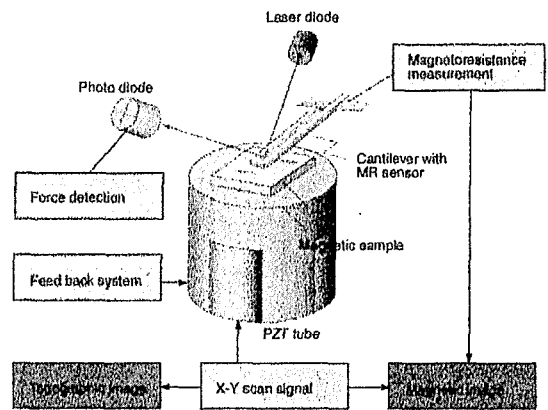


図4 走査磁気抵抗効果顕微鏡

他の方法として SMRM の適用を考えた。磁気抵抗効果素子と AFM のカンチレバーとを複合化し、試料-プローブ間の距離制御が可能な SMRM の作製をした (図4)⁽³⁾。ハードディスク用読み出しヘッドをジンバルとサスペンションで保持したものの研究は過去にあるが一体化したものはなく、交換相互作用を磁気抵抗で計測する目的では距離制御が重要である。素子の微細化をするために電子線リソグラフィとフォトリソグラフィを組み合わせで作製したサブミクロンオーダーの素子を搭載した。MR 素子を搭載したカンチレバーを用いて、試料からの漏洩磁場による磁気抵抗変化および表面構造の観測が出来た。交換相互作用の測定に対しては更に素子の微細化ならびに高感度化が必要である。

II. 新物質の探索

磁性体/AlAs/GaAs におけるスピン偏極トンネリング (アイリアス: ポスターセッション参照)

光励起 GaAs 探針を用いた SP-STM における偏極電子のトンネル機構を知るために、磁性体/AlAs/GaAs トンネル接合についての実験を行った。すなわち低温 (25K) で光学系の量子化軸と強磁性体薄膜の磁化方向を一致させて実験系を構成し、磁性体から注入されたスピン偏極電子の GaAs 内での再結合による発光の円偏光を測定する。強磁性薄膜として Co、Fe、パーマロイを用い、いずれの場合も円偏光のルミネッセンスが観測されている。

Ⅲ. スピンエレクトロニクス

ナノプローブによるスピン・マニピュレーション (澤村：ポスターセッション参照)

探針先端における原子スケールのスピン偏極状態を分子軌道論の立場から論じ、そのメカニズムを明らかにすると共に、このメカニズムにのっとり SPM での観測あるいは操作への応用を検討してきた。

①. GaN 探針ナノ構造の自発的スピン偏極⁽⁴⁾

GaN の探針先端スピン電子状態を第一原理的分子軌道法を用いて調べた。その結果、探針先端の表面に不対電子が数多く存在し、これらの電子のスピンが自発的に偏極しており、現象論的には、フントの規則から、ナノ構造内の電子がハイスピン状態を取ると考えられる。ナノ構造が特殊なスピン状態を生成することを示し、これから任意のスピン状態を持ったナノ構造をデザインする指針を示した。

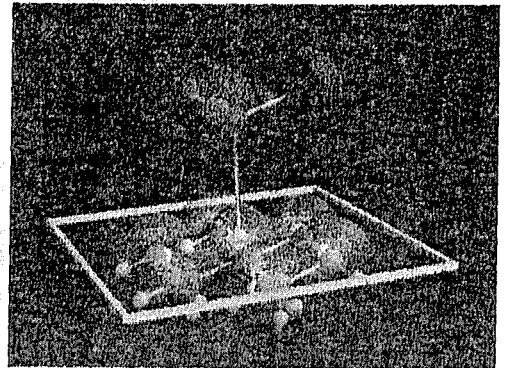


図5 シリコン表面からの水素脱離

②. STM 探針下のシリコン表面からの水素脱離過程⁽⁵⁾

SPM Pt 探針のスピン偏極状態を Si 表面にトンネル移動させることにより、表面電子状態をスピン偏極させ、Si 表面と吸着 H 原子の結合を破壊し、脱離させることを示した。従来、探針に電界パルスを与えることによる吸着水素原子の脱離を説明することは難しかった。本研究はその物理的な原理を示し、トンネルによる表面スピン制御の可能性を示した。

③. Au 探針-Au 試料間に生ずる Au 原子架橋の異常原子間距離

SPM の探針と表面間に形成されるナノワイヤ (原子架橋) のスピン電子状態は探針-表面間距離の制御に大きく依存することが分かった。ナノワイヤの崩壊過程においては、原子間のクーロン相互作用に加えて、スピン同士の相互作用が密接に関わっていることが分かった。本研究は、探針によるナノワイヤのスピン状態のダイナミックな制御の可能性を示した

3. 結論

以上、最終年を迎え、図1に示すような当初の計画通りには進んでいないが、いずれのテーマにおいてもより本質的な段階に入っていると考えられる。スピン計測に対してスピン状態像のより合理的でかつ普遍的理解が得られる様に残された時間を有効に使いたいと考えている。

文献

- (1) K.Sueoka et al. : SPS2000.Abst., p.11(2000)
- (2) H.Hosoi et al. : Appl.Surf.Sci., 157,218(2000)
- (3) 木村道哉他：応用磁気学会誌、(2000)投稿中
- (4) M.Sawamura et al. : J.Mag.Soc.Japan, 23, 1165(1999)
- (5) M.Sawamura et al. : Jpn.J.Apple.Phys, 38, 3853(1999)