

「量子効果等の物理現象」

平成7年度採択研究代表者

武笠 幸一

(北海道大学大学院工学研究科 教授)

「スピン計測—スピンSPMの開発とスピン制御—」

1. 研究実施の概要

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。第1に物質表面のスピンの状態を原子分解能で測定可能な走査プローブ顕微鏡（スピン SPM）の開発を行う。本研究ではスピン状態の計測・理解からスピン制御を行い、表面新物質層の創製を行うものである。

この目的にそってスピン SPM としては、スピン偏極走査型トンネル顕微鏡（SP-STM）および交換相互作用力顕微鏡（EFM）の研究開発を行い、観測の可能性が見えてきている。

2. 研究実施内容

I スピン SPM の開発

1) SP-STM の開発

特定の試料を用いてスピン偏極トンネル効果の検証をおこなうのではなく、汎用性のある測定が可能なスピン偏極度測定手法を見いだすことを目指して探針の作成と、探針のスピン分解特性の評価を行う。スピン分解能を持つと期待される探針材料候補のうち、光励起半導体探針に注目し研究を進めてきた。トンネル電流のスピン依存性を明確にすることによりスピン依存の二次元画像化が可能である。光励起 GaAs を用いたスピン偏極トンネル効果検出に関して基本原理を再考するとともに、GaAs 薄膜—磁性体探針、GaAs 劈開清浄表面—磁性体探針等の系において得られた結果について整理し、GaAs 探針を用いるときの測定条件および問題点について考察をしてきた。GaAs の探針作製方法には劈開によるもの、エッチングによるもの、異方性エッチングによるもの、結晶成長によるものなどが考えられる。また対称性の高い探針や任意形状の探針の作製法には FIB 加工が有効である。試料面内成分と試料に垂直な両成分の測定が可能な薄膜 GaAs を劈開して作製した探針を提案した。トンネル電流のスピン偏極トンネル成分を測定するために観測系を組み立て実験をおこない、検出されたトンネル電流の変化成分は磁性体試料の磁化状態に

依存したスピン偏極トンネル効果によるものであることが分かった。試料としては MgO 基板上に Fe を 25ML 成長させて実験をおこなった。光励起 GaAs 探針を用いたスピン偏極 STM 実験では GaAs 探針の表面準位、試料の磁気円二色性による影響等の詳細を検討中である。

2) EFM の開発

原子レベルで表面の磁性を観察する手段として、走査トンネル電子顕微鏡 (STM) や原子間力顕微鏡 (AFM) を基にした方法が期待される。本研究グループでは AFM を拡張した交換相互作用力顕微鏡 (Exchange Force Microscope:EFM) の開発をも目指している。これは探針・試料間に働く交換相互作用力を直読する原子間力顕微鏡で、力の測定を基本とする故に酸化物などの絶縁体表面や化学・生物分野への応用・展開が期待される。

実験技術開発に先立ち、開発指針を得るために第一原理計算から探針・試料間に働く交換相互作用力の理論的評価を進めた。ここでは、探針・試料として 2 枚の Fe 薄膜よりなる薄膜・薄膜モデルで計算をおこなった。交換相互作用力は表面に対する原子サイト依存性が顕著であることを明らかにした。例えば、一方の薄膜表面原子を他方の薄膜表面の原子空隙サイトから原子直上サイトに移動させると、交換相互作用力は $10^{-9} \sim 10^{-10} \text{N}$ のオーダーで変化する。これは原子分解能を有する磁気的な力顕微鏡の可能性を示している。現在、上記の計算モデルに考慮されていない探針形状の効果や表面緩和を考慮した計算を進め、より定量的に探針・試料間の交換相互作用力の評価を行っている。

一方、交換相互作用力の実験的測定を実現するためには、従来の AFM の力測定機構に対し、次の改良すべき点が挙げられる。

- ①交換相互作用力は非常に接近した探針・試料間距離で生じることから、探針・試料間距離の制御法の開発が必要である。
- ②交換相互作用力が生じる探針・試料間距離ではファンデルワールス力など非磁性的な力の寄与も強く現れる。従って、探針・試料間の交換相互作用力を評価する実験的手法の開発が必要である。

これらの技術開発が交換相互作用力測定の成功の鍵となるものと考えられる。現在、我々は以下に示す 2 つの力測定法の検討を進めている。

- ①Dynamic Force Microscope による磁性体探針・磁性体試料間の力測定
- ②磁気共鳴を利用した交換相互作用力の検出

また、探針・試料間の交換相互作用力に基づく磁気抵抗効果を利用した顕微鏡の可能性についても検討している。

II 新物質の探索

1) ミクロな表面磁性

遷移金属の磁気的特性と超薄膜の形態の相互依存についてそのメカニズムに立ち入って定量的に検討を進める。MgO(001)基板上に表面粗さを制御した Cu バッファ層を成長し、その上に 20 周期の約 6 原子層 Fe, 10 原子層 Cu の多層膜を作成した。試料成長中の RHEED 観察を行い表面粗さをみつもり、表面荒さが増加すると Fe 1 原子あたりの磁気モーメントは増加していることが分かった。STM 像の高さ情報の標準偏差の走査面積依存性をスケーリング法を使用して解析すると荒さを量的に表示できる係数 α を得る。係数 α は RHEED 解析と同様な磁性の形態相互依存性を示している。界面に依存する Fe 原子の Cu 配位数はその界面の形態や荒さに依存している。Fe 原子の電子状態が近接原子 Fe だけである場合と比べて変わり、Fe 1 原子あたりの磁気モーメントが変わるであろう。上記の効果を実験的に検討するためサブモノレイヤー Fe の試料を作成している。

III スピンエレクトロニクス

1) ナノ構造スピン素子

本研究の目的は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ことにある。閃亜鉛構造の窒化ガリウム探針先端について、結晶軸 $\langle 111 \rangle$ および $\langle 100 \rangle$ を軸に持つ二つのピラミッド型にクラスター模型を構成する。

クラスター模型のスピン電子状態を unrestricted Hartree-Fock 法を用いて計算した。一重項、三重項などのスピン多重度ごとに電子状態と全エネルギーを決定する。ただし、内殻電子は原子核と共に有効ポテンシャルを用いている。ここで、スピン多重度からスピン偏極度を全価電子数に占める偏極スピン数の割合と定義した。例えば Ga 原子を先端にした $\langle 111 \rangle$ 軸上のクラスター模型で 13 重項において最小エネルギーを示した。このクラスターのスピンの偏極度は 11.8% となった。従ってナノ構造物質には外場を与えることなしにスピン偏極状態を作り出す性質があることが予測される。この機構を利用してナノ構造においてスピン偏極状態を人工的に作ることが可能かもしれない。この指針として次の条件が考えられる。

- (1) III-V 族あるいは II-VI 族化合物の探針についてはその構成元素の電気陰性度の差が大きい。
- (2) 高い対称性を有する。

今後、他の III-V 族あるいは II-VI 族化合物のスピンの特性を研究し、本研究において示した仮説を証明していく予定である。

3. 主な研究成果の発表 (論文発表)

○H.Kodama, T.Uzumaki, M.Oshiki, K.Sueoka and K.Mukasa : Spin-polarized tunneling by spin-polarized scanning tunneling microscopy, Journal of Applied

Physics,83(11,Part2):6831-6833 (1998)

- 末岡和久, 細山直樹, アグス・スバギヨ, 武笠幸一, 早川和延 : STM による光照射 GaAs 薄膜劈開探針の研究, 表面科学, 19:522-526 (1998)
- 武隈育子, 安井雅彦, 奥村善信, 秋田憲, 末岡和久, 長谷山美紀, 武笠幸一 : 確率信号としての磁気力顕微鏡像の解析手法, 応用磁気学会誌, 22:1251-1256 (1998)
- K.Nakamura, T.Oguchi, H.Hasegawa, K.Sueoka, K.Hayakawa and K.Mukasa, : Theoretical study of the exchange force between magnetic Fe films; feasibility of exchange force microscopy, Jpn. J. Appl. Phys.,37:6575-6579 (1998)
- M.Sawamura, T.Maruyama and K.Mukasa : Theoretical Study on Spin Polarization of III-V Compound Tips, Journal of Magnetism Society of Japan, Vol. 23, No. 1-2:721-723 (1999)

他1件