

プログラム名：「無充電で長期間使用できる究極のエコ IT 機器の実現」

PM 名： 佐橋 政司

プロジェクト名： 電圧トルク MRAM プロジェクト

委 託 研 究 開 発

実 施 状 況 報 告 書 (成 果)

平 成 2 8 年 度

研究開発課題名：

電圧効果ダイナミクスの解明と高性能化

研究開発機関名：

千葉大学 大学院融合科学研究科

研究開発責任者

山田 豊和

I 当該年度における計画と成果

1. 当該年度の担当研究開発課題の目標と計画

「電界」による磁気異方性制御が実現すれば、電力消費フリーな次世代エコ磁気情報デバイス産業が創出され、人類の情報へのニーズと電力消費という相反する課題を解決できる。本研究「STMによるMgO基板上のFe単原子膜の巨大磁気異方性の原理解明」は、電界制御磁気素子として実用化に最も近いFe/MgO界面に焦点を当てる。電界印加のために数原子層までFeを薄くした結果、原子レベルでのFe/MgO界面の不完全性がデバイス全体の特性を左右しかねない事態となり、Fe/MgO界面での磁気異方性の電界依存性の起源が揺らいでいる。我々は、走査トンネル顕微鏡(STM)技術を駆使して、原子レベルで平坦なbcc-MgO(001)超薄膜の上のFe単原子膜の巨大磁気異方性の発現の原理解明を行い、次世代電界制御型・磁気素子開発実現を目指す。

平成27年度までに我々は苦心の末、Fe(001)基板を1原子層厚さだけ酸素膜でコートすることでFeの活性を抑え、この上にMgO膜を作成することに成功した。さらにこの上にFe単原子膜を蒸着するとギャップは消え金属状態に戻ることを確認した。

Fe/MgO界面の磁気異方性を、STMを用いて直接観察するためには、STM電子分光曲線(dI/dV曲線と呼ぶ)を測定しなくてはならない。Fe膜上でdI/dV曲線を測定する。磁性物質はフェルミ準位近傍でスピン偏極した3d電子軌道に由来する電子スピン状態ピークを有する。スピン偏極したSTM磁性探針でスピン偏極磁性物質を計測すると、トンネル磁気抵抗効果が生じ探針のスピンを軸として、相対的な試料スピン方向によりdI/dV曲線中のスピン偏極状態ピークのdI/dV値が変化する。平行な場合が最もdI/dV値は最大となり、反平行の場合最少となる。

Fe/MgO界面では、特に、「面直」か「面内」の磁気異方性がどの程度あるのかが最も関心のある点である。そのためには、STM測定を行いながら面直(z方向)と面内(x-y方向)に磁場をかけなくてはならない。市販の磁界STMでは、通常z方向だけに極めて大きな磁界(5-10テスラ)をかけることができるものが多いが、超伝導コイル機構だけで1億円もかかる。しかし、Feのような強磁性物質であれば、比較的弱い磁界で十分である。そこで、我々は本年度自作にて比較的小型の超伝導コイル(超高真空対応)を5個作製し、これをSTM装置周辺に設置することで、STM測定を行いながらx、y、z方向に磁界を印加できる機構を作成し磁界を印加することを目指した。

2. 当該年度の担当研究開発課題の進捗状況と成果

2-1 進捗状況および2-2 成果

超伝導コイルを作成するために被覆NbTi線を購入した。アルミ製(表面アルマイト処理)のボビン設計・作成した。これにNbTi線を1個につき約10000回巻いた。1層巻くごとに超高真空対応の特殊非伝導接着剤を丁寧に塗り、巻線にたわみが生じないように注意して作成した。1個のコイルを作成するのに約1-2週間を要した。作成したコイルを室温にて100℃で加熱し接着剤を完全に硬化した。硬化があまいと、超高真空・極低温下で超伝導コイルに電流を流した際に磁力で線がわずかに動き、クエンチする原因となる。

STMが釣り下がっている超高真空クライオスタットの底面に、超伝導コイルを固定するための支柱を取り付けた。支柱に1個ずつ超伝導コイルを取り付けた。大気下で、それぞれのコイルに電流を流し、計算通りの磁界が発生したことを、磁束計を用いて確認した。

さらに大変なのはここからであった。超伝導コイルに電流が流さなくてはならない。クライオスタット上部より超高真空電流導入端子を介して大気から真空内に電流を送る。クライオスタットは内槽と外槽の2重構造になっている。外槽には液体窒素がはいる(78K)。内槽には液体ヘリウムがはいる(4K)。まず、クライオスタット上部から真空槽の内壁をつたって外槽底まで銅線を配線した。銅線の断面積が大きければ室温から熱流入し、小さければ電流印可に際し発熱する。熱流入の式より適度な断面積を選択した。次に、外槽底から外槽と内槽の間を通り、内槽上から内槽を通して(内槽に配線用に穴をあらかじめ作成するようクライオスタット購入時に特注した)STMの所まで、高温超電導線を配線した。高温超電導線は高額であるが長さ5-10m程度であれば10-20万円で購入できた。高温超電導線の転移温度は100Kであるため、液体窒素温度以下で超伝導となる。x、y、z方向にかけるため同様の3つのラインを作成した。STM上まできた高温超電導線をコイルNbTi線と接続する。もっとも恐れるのは接続部の接触抵抗である。接触抵抗により局所的に温度が上昇し通電中に超伝導が壊れればクエンチしSTM計測は破たんする。銅部品で慎重に両線をはさみ、さらにインジウムを挟んで接触をよくした(挟んでおき150°C温風あてる)。

苦心の末に、5個を取り付け、冷却した。抵抗をモニターすると、想定通りに100Kでまず大きく抵抗は下がり(高温超電導線が超伝導化)、10KでNbTiコイルが超伝導になり抵抗は~0オームとなった。

現在までの所、コイルそれぞれの電流を流し磁界を発生することは確認した。最後のステップがある。x方向とz方向はそれぞれ2つのコイルをSTMを挟んで対象位置に固定し、ヘルムホルツ型のコイルとする。これによる2つのコイル中心軸間の磁界は一樣となる。我々のSTM機構にはxとz方向に粗動機構があり、またダンパーによりz方向にSTMは5-10mm移動するため、一樣な磁界が求められる。ヘルムホルツ型磁石は市販STMでもまだ試みがない。2つの超伝導コイルのNbTi線を接続するため、銅部品・インジウム・超高真空用導電性接着剤で接着した。ここまでが平成28年度中に行ったことである。

ヘルムホルツ型超伝導コイルによるx、y、z方向に磁界を印加してのSTM計測は世界初の試みであり、想定以上にさまざまな困難やトラブルが生じた。それでも本研究目的を達成するためにはどうしても必要な技術であるため、忍耐強く開発を行ってきた。次は、ヘルムホルツ型を冷却し実際に電流を流し磁界を発生させる。

2-3 新たな課題など

なし。

3. アウトリーチ活動報告

特になし。